

ISSN 2221-3198
e-ISSN 2686-7486

ГЕОЛОГИЯ И ГЕОФИЗИКА ЮГА РОССИИ

**GEOLOGY
AND GEOPHYSICS
OF RUSSIAN SOUTH**

**Том 10
№ 4 / 2020**



ISSN 2221-3198
e-ISSN 2686-7486

Геофизический институт Владикавказского научного центра
Российской академии наук

ГЕОЛОГИЯ И ГЕОФИЗИКА ЮГА РОССИИ

**GEOLOGY AND
GEOPHYSICS
OF RUSSIAN SOUTH**

**Том 10
№ 4 / 2020**

Владикавказ 2020

**РЕДАКЦИОННАЯ КОЛЛЕГИЯ ЖУРНАЛА
«ГЕОЛОГИЯ И ГЕОФИЗИКА ЮГА РОССИИ»**

Главный редактор

д. ф.-м. н., проф. **В. Б. Заалишвили**, Геофизический институт Владикавказского научного центра РАН, г. Владикавказ

Заместитель главного редактора

д. ф.-м. н., проф. **И. А. Керимов**, Институт физики Земли им. О. Ю. Шмидта РАН, г. Москва

Члены редакционной коллегии

академик РАН **В. А. Бабешко**, Южный научный центр РАН, г. Ростов-на-Дону
академик РАН **А. Д. Гвишиани**, Геофизический центр РАН, г. Москва
академик РАН **М. Ч. Залиханов**, Высогогорный геофизический институт, г. Нальчик
академик АНГ **Т. Л. Челидзе**, Институт геофизики им. М. Нодия, Грузия
член-корр. НАНА **Г. Д. Етирмишли**, Республиканский Центр Сейсмологической Службы при НАНА, Азербайджан
член-корр. РАН **Д. Р. Каплунов**, Институт проблем комплексного освоения недр РАН, г. Москва
член-корр. НАН РА **С. М. Оганесян**, Институт геофизики и инженерной сейсмологии АН РА, Армения
член-корр. РАН **В. А. Снытко**, Институт истории естествознания и техники имени С. И. Вавилова РАН, г. Москва
член-корр. РАН **А. А. Соловьев**, Геофизический центр РАН, г. Москва
член-корр. РАН **П. Н. Шебалин**, Институт теории прогноза землетрясений и математической геофизики РАН, г. Москва
Ph. D., проф. **И. А. Береснев**, Университет штата Айова, США

д. г.-м. н., проф. **М. Г. Бергер**, Геофизический институт Владикавказского научного центра РАН, г. Владикавказ

Ph. D., проф. **Ко-Лян Вэнь**, Национальный центральный университет, Тайвань

Ph. D., проф. **Г. П. Ганапати**, Центр по смягчению последствий стихийных бедствий и управлению, Технологический институт Веллур, Индия

д. т. н., проф. **И. Д. Музаев**, Геофизический институт Владикавказского научного центра РАН, г. Владикавказ

Ph. D., проф. **Т. Пападопулос**, Афинский национальный университет, Греция

д. г.-м. н., проф. **С. Г. Парада**, Южный научный центр РАН, г. Ростов-на-Дону

Ph. D., проф. **А. Пинар**, Босфорский университет, Турция

д. г.-м. н., проф. **Е. А. Рогожин**, Институт физики Земли им. О. Ю. Шмидта РАН, г. Москва

д. ф.-м. н., проф. **Ю. К. Чернов**, Северо-Кавказский государственный технический университет, г. Ставрополь

д. г.-м. н. **В. И. Черкашин**, Институт Геологии Дагестанского научного центра РАН, г. Махачкала

д. г. н. **В. А. Широкова**, Государственный университет по землеустройству, Институт истории естествознания и техники имени С. И. Вавилова РАН, г. Москва

Ответственный секретарь

к. т. н. **Д. А. Мельков**, Геофизический институт Владикавказского научного центра РАН, г. Владикавказ

Выпускающий редактор

Х. О. Чотчаев, Геофизический институт Владикавказского научного центра РАН, г. Владикавказ

Высшей аттестационной комиссией (ВАК) журнал включен в Перечень ведущих рецензируемых научных журналов и изданий, в которых должны быть опубликованы основные научные результаты диссертаций на соискание ученой степени доктора и кандидата наук

Журнал издается с 2011 года.

Периодичность издания – 4 номера в год

Учредитель:

ВНЦ РАН

Адрес учредителя:
362027, РСО-Алания, г. Владикавказ,
ул. Маркуса 22
Тел.: 8 (8672) 501841
e-mail: vncran@yandex.ru
<http://www.vncran.ru>

Издатель:

Геофизический институт Владикавказского научного центра Российской академии наук

Адрес издателя и редакции:
362002, РСО-Алания, г. Владикавказ, ул. Маркова 93а
Тел.: 8 (8672) 764084; факс: 8 (8672) 764056
e-mail: southgeo@mail.ru
<http://geosouth.ru>

ISSN 2221-3198

e-ISSN 2686-7486

Подписной индекс в Объединенном каталоге «Пресса России» – 29119

При перепечатке материалов ссылка на журнал обязательна.

© Геофизический институт ВНК РАН, 2020

Фото на обложке – Санибанский перевал (К.С. Харебов)

**EDITORIAL BOARD OF «GEOLOGY AND GEOPHYSICS
OF RUSSIAN SOUTH» JOURNAL**

Editor in Chief

Vladislav B. Zaalishvili, Dr. Sci. (Phys.-Math.),
Prof., Geophysical Institute of Vladikavkaz Scientific
Center of the Russian Academy of Sciences, Vladikavkaz

Deputy Editor in Chief

Ibragim A. Kerimov, Dr. Sci. (Phys.-Math.), Prof.,
Schmidt Institute of Physics of the Earth of RAS,
Moscow

Members of Editorial board

Vladimir A. Babeshko, Academician of RAS, Southern
Scientific Center of RAS, Rostov-on-Don

Alexey D. Gvishiani, Academician of RAS, Geophysical
Center of RAS, Moscow

Mikhail Ch. Zalikhonov, Academician of RAS, High
Mountain Geophysical Institute, Nalchik

Tamaz L. Chelidze, Academician of Georgian National
Academy of Sciences (GNAS), M. Nodia Institute of
Geophysics, Georgia

Gurban D. Yetirmishli, Academician of Azerbaijan
National Academy of Sciences (ANAS), Republican
Seismic Survey Center of ANAS, Azerbaijan

David R. Kaplunov, Corresponding Member of RAS,
Institute of Comprehensive Exploitation of Mineral
Resources Russian Academy of Sciences, Moscow

Sevada M. Hovhannisyan, Academician of National
Academy of Sciences of the Republic of Armenia (NAS
RA) A. Nazarov Institute of Geophysics and Engineering
Seismology of NAS RA, Armenia

Valerian A. Snyitko, Corresponding Member of RAS,
S.I. Vavilov Institute for the History of Science and
Technology of RAS, Moscow

Anatoly A. Soloviev, Corresponding Member of RAS,
Geophysical Center of RAS, Moscow

Peter. N. Shebalin, Corresponding Member of
RAS, Institute of Earthquake Prediction Theory and
Mathematical Geophysics of RAS, Moscow

Igor A. Beresnev, Ph.D., Iowa State University, USA
Mikhail G. Berger Dr. Sci. (Geol.-Min.), Prof.,
Geophysical Institute of Vladikavkaz Scientific Center of
the Russian Academy of Sciences, Vladikavkaz

Kuo-Liang Wen, Ph. D., National Central University, Taiwan
Ganapathy Pattukandan Ganapathy, Ph.D, Prof.
Centre for Disaster Mitigation and Management Vellore
Institute of Technology, India

Illarion D. Muzaev Dr. Sci. (Tech.), Prof., Geophysical
Institute of Vladikavkaz Scientific Center of the Russian
Academy of Sciences, Vladikavkaz

Taxiarchis Papadopoulos Ph. D., Prof, University
of Athens, Greece

Sergey G. Parada Dr. Sci. (Geol.-Min.), Prof., Southern
Scientific Center of RAS, Rostov-on-Don

Ali Pinar, Ph. D., Prof., Boğaziçi University, Kandilli
Observatory and Earthquake Research Institute,
Department of Earthquake Engineering, Turkey

Evgeniy A. Rogozhin Dr. Sci. (Geol.-Min.), Prof.,
Schmidt Institute of Physics of the Earth of RAS,
Moscow

Yuriy K. Chernov Dr. Sci. (Phys.-Math.), Prof., North
Caucasus Federal University, Stavropol

Vasily I. Cherkashin Dr. Sci. (Geol.-Min.), Institute of
Geology of Daghestan Scientific Centre of RAS (IG DSC
RAS), Makhachkala

Vera A. Shirokova Dr. Sci. (Geog.), State University of
Land Use Planning, S.I. Vavilov Institute for the History
of Science and Technology of RAS, Moscow

Executive Secretary

Dmitry A. Melkov, Cand. Sci. (Tech.), Geophysical
Institute of Vladikavkaz Scientific Center of the Russian
Academy of Sciences, Vladikavkaz

Managing Editor

Khyisa O. Chotchaev, Geophysical Institute of
Vladikavkaz Scientific Center of the Russian Academy
of Sciences, Vladikavkaz

By the Higher Attestation Commission the Journal is included in the List of Leading Peer-reviewed Scientific Journals and Publications, in which the main scientific results of the thesis for the degree of Candidate of Science, Doctor of Science should be published.

The Journal is published since 2011.
Frequency of publication – 4 issues per year

Founder:

Vladikavkaz Scientific Center of RAS
Founder address:
22, Markusa Str., Vladikavkaz, RNO-Alania,
362027 Russia
Tel.: +7 (8672) 501841
e-mail: vncran@yandex.ru
<http://www.vncran.ru>

Publisher:

**Geophysical Institute of the Vladikavkaz Scientific
Center of the Russian Academy of Sciences**
Publisher and Editorial address:
93a, Markova Str., Vladikavkaz, RNO-Alania,
362002 Russia
Tel.: 8 (8672) 764084; Fax: +7 (8672) 764056
e-mail: southgeo@mail.ru
<http://geosouth.ru>

ISSN 2221-3198
e-ISSN 2686-7486

Subscription index in the United catalog "Press of Russia" - 29119
In the case of reproduction, a reference to the journal is obligatory.

© Geophysical Institute VSC RAS, 2020

Cover photo – Sanibanskiy passage (K.S. Kharebov)

СОДЕРЖАНИЕ

ОБЩАЯ И РЕГИОНАЛЬНАЯ ГЕОЛОГИЯ	
Гурбанов А. Г., Докучаев А. Я., Лексин А. Б., Газеев В. М., Гурбанова О. А., Лолаев А. Б., Оганесян А. Х.	
О возможности обнаружения промышленного ранне-среднеюрского полиметаллически-золото-платиноидного оруденения черносланцевого типа в Северной Осетии (часть 1)	6
Январёв Г. С.	
Новейшая структура и геодинамика Западного Предкавказья (на основе дешифрирования космоснимков)	30
ГЕОТЕКТНИКА И ГЕОДИНАМИКА	
Казымова С. Э.	
Уточнение гипоцентров землетрясений методом двойной разности.....	41
Свалова В. Б.	
Геодинамика и геотермия Прикаспийской впадины и восточного сегмента Кавказского региона.....	52
Чотчаев Х. О., Бурдзиева О. Г., Заалишвили В. Б.	
Влияние геодинамических процессов на геоэкологическое состояние высокогорных территорий.....	70
ГЕОФИЗИКА	
Дещеревский А. В., Идармачев Ш. Г., Идармачев И. Ш.	
Влияние изменения уровня воды в Чиркейском водохранилище на кажущееся сопротивление пород Хадумского купола, расположенного в его окрестности.....	101
Дмитриева И. Ю., Саяпина А. А., Багаева С. С., Горожанцев С. В.	
Макросейсмические и инструментальные исследования Верхне-Фиагдонского землетрясения 26 января 2020 года	113
ГЕОЛОГИЯ, ПОИСКИ И РАЗВЕДКА ТВЕРДЫХ ПОЛЕЗНЫХ ИСКОПАЕМЫХ, МИНЕРАГЕНИЯ	
Пхарое Б. Л., Евдокимов А. Н.	
Состав и реконструкция источников сноса терригенных отложений на северо-западе ЮАР	124
ГЕОЛОГИЯ, ПОИСКИ И РАЗВЕДКА НЕФТЯНЫХ И ГАЗОВЫХ МЕСТОРОЖДЕНИЙ	
Мамаев С. А., Юсупов А. Р., Мамаев А. С., Юсупов З. А.	
Сеймотектоника высокогорной части Восточного Кавказа и перспективы газоносности на примере естественного проявления газа с. Цущар (Дагестан).....	150
ГЕОТЕХНОЛОГИЯ. ГЕОМЕХАНИКА	
Мусаев В. К.	
Математическое моделирование нестационарных упругих волн напряжений (переходной процесс) при воздействии (вертикальное сосредоточенное в виде треугольного импульса) на поверхности полуплоскости (задача Лэмба)	164
ПАМЯТЬ	
Гогмачадзе Серго Акакиевич	175

CONTENTS

===== GENERAL AND REGIONAL GEOLOGY =====	
Gurbanov A. G., Dokuchaev A. Ya., Lexin A. B., Gazeev V. M., Gurbanova O. A., Lolaev A. B., Oganessian A. Kh.	
On the possibility of detecting of industrial Early-Middle Jurassic polymetallic-gold-platinoid mineralization of the black-shale type in North Ossetia (Part 1)	6
Yanvarev G. S.	
Latest structure and geodynamics of Western Caucasus (based on decoding of satellite images)	30
===== GEOTECTONICS AND GEODYNAMICS =====	
Kazimova S. E.	
Redefinition of earthquake hypocenters by the double difference method	41
Svalova V. B.	
Geodynamics and geothermics of Pre-Caspian Depression and eastern segment of Caucasus region	52
Chotchaev Kh. O., Burdzieva O. G., Zaalishvili V. B.	
Influence of geodynamic processes on the geoecological state of high mountain areas	70
===== GEOPHYSICS =====	
Desherevsky A. V., Idarmachev S. G., Idarmachev I. S.	
Influence of change of water level in Chirkey reservoir on the apparent resistivity of Khadumskiy dome rocks, located in its surroundings	101
Dmitrieva I. Yu., Sayapina A. A., Bagaeva S. S., Gorozhantsev S. V.	
Macro seismic and instrumental studies of the Verkhniy Fiagdon earthquake on January 26, 2020	113
===== GEOLOGY, PROSPECTING AND EXPLORATION OF OIL AND GAS FIELDS =====	
Pharoe B. K., Evdokimov A. N.	
Composition and provenance reconstruction of terrigenous deposits in the North- West of South Africa	124
===== GEOLOGY, PROSPECTING AND EXPLORATION OF OIL AND GAS FIELDS =====	
Mamaev S. A., Yusupov A. R., Mamaev A. S., Yusupov Z. A.	
Seismotectonics of the high mountain part of the Eastern Caucasus and the prospects of gas content on the example of the natural manifestation of gas in Tsuschar village (Dagestan)	150
===== GEOTECHNOLOGY, GEOMECHANICS =====	
Musayev V. K.	
Mathematical modeling of non-stationary elastic stress waves (transient process) under load (Vertical Concentrated as a Triangular Pulse) applied at the surface of a half-plane (Lamb's problem)	164
===== MEMORY =====	
Gogmachadze Sergo Akakievich	175

ОБЩАЯ И РЕГИОНАЛЬНАЯ ГЕОЛОГИЯ

УДК 552.323.5

DOI: [10.46698/VNC.2020.37.45.001](https://doi.org/10.46698/VNC.2020.37.45.001)

Оригинальная статья

О возможности обнаружения промышленного ранне-среднеюрского полиметаллически- золото-платиноидного оруденения черносланцевого типа в Северной Осетии (Часть 1)

А. Г. Гурбанов^{1, 2}, А. Я. Докучаев¹, А. Б. Лексин¹, В. М. Газеев^{1, 2},
О. А. Гурбанова³, А. Б. Лолаев^{2, 4}, А. Х. Оганесян^{2, 5}

¹Министерство науки и высшего образования Российской Федерации Федеральное государственное бюджетное учреждение науки Институт геологии рудных месторождений петрографии, минералогии и геохимии Российской академии наук (ИГЕМ РАН), Россия, 119017, г. Москва, Старомонетный пер., 35, e-mail: gurbanov@igem.ru;

²Министерство науки и высшего образования Российской Федерации Федеральное государственное бюджетное учреждение науки «Владикавказский научный центр РАН», Россия, 362027, РСО-Алания, г. Владикавказ, ул. Маркуса, 22, e-mail: gazeev@igem.ru;

³Министерство науки и высшего образования Российской Федерации ФГБОУ высшего образования Московский государственный университет имени М. В. Ломоносова (МГУ), Россия, 119991, г. Москва, Ленинские горы, д. 1;

⁴Министерство науки и высшего образования Российской Федерации ФГБОУ высшего образования Северо-Осетинский государственный университет имени К. Л. Хетагурова, Россия, 362025, РСО-Алания, г. Владикавказ, ул. Ватутина, 44-46;

⁵Министерство науки и высшего образования Российской Федерации ФГБОУ высшего образования Северо-Кавказский горно-металлургический институт (государственный технологический университет) (СКГМИ, ГТУ), Россия, 362021, РСО-Алания, г. Владикавказ, ул. Николаева, 44

Статья поступила: 03.08.2020, после рецензирования: 16.09.2020, принята к публикации: 01.10.2020

Резюме: Актуальность исследований. Статья посвящена проблеме выявления характера и причин платино- и палладиенности золоторудных месторождений: 1) в докембрийских черносланцевых и углеродосодержащих толщах Центральной зоны Северного Тянь-Шаня; 2) на Урале, где промышленно значимая золотоносность связана с колчеданосными структурами и вещественными комплексами наложенных вулcano-плутонических поясов активной континентальной окраины; 3) на северо-востоке Азии и Дальнем Востоке, где сиалический профиль областей генерации магматических расплавов, в целом, обусловил их региональную геохимическую оловянно-благороднометалльную специализацию; 4) в черносланцевых толщах тимоского типа на железорудных месторождениях-гигантах Курской магнитной аномалии (КМА) и Воронежского кристаллического массива (ВКМ) Центральной России. Важнейшим компонентом железистых кварцитов КМА, ВКМ, а также сформировавшихся по ним залежей богатых железных руд доверхневизейской коры выветривания и промпродуктов горнорудных предприятий явля-

ются благородные металлы, ставшие одним из крупнейших нетрадиционных источников селективной и попутной золото-платинодобычи; 5) на Северном Кавказе в девонских черных сланцах р. Большая Лаба были обнаружены минералы самородной платины; установлена их платиноносность и перспективность обнаружения в них промышленно значимых рудных объектов. Результаты комплексных исследований девонских черных сланцев зоны Передового хребта Северного Кавказа показали, что существует единый ультрабазитовый источник как для Au, так и для Pt, Pd. Минеральные формы группы платиноидов в черных сланцах и в магматических породах часто устанавливаются только при микронзондовых или электронно-микроскопических исследованиях. **Цель исследований** – расширение минерально-сырьевой базы Южного Федерального округа РФ на благородные металлы. **Методы исследования** – проведение в пределах Авсандур-Ламардонского рудного поля и Фиагдонского хвостохранилища представительного опробования рудных тел, вмещающих их пород и материала хвостохранилища; их анализ количественными методами (пробирный и ICP MS анализы) для определения содержаний золота, платины и ЭПГ. **Полученные результаты и их обсуждение.** До 2019 г. считалось, что на Северном Кавказе потенциально рудоносными на благородные металлы являются только углеродсодержащие девонские черные сланцы. Однако, при проведении минералого-геохимических исследований количественными методами (XRF, ICP MS) промышленных отходов Фиагдонской обогатительной фабрики, перерабатывавшей руды Какадур-Ханикомского и Кадат-Хампаладагского полиметаллических месторождений, расположенных в полосе развития углеродсодержащих черных аргиллитов ниже-среднеюрского возраста, впервые были выявлены повышенные концентрации благородных металлов (в г/т): Au – от 0,05 до 0,35; Pd – от 0,042 до 0,049; Pt – от 0,07 до 1,29. Анализ четырех проб аргиллитов из разных частей разреза толщи черных аргиллитов выявил в них вариации содержания (в г/т): Pd – от 0,003 до 0,01; Pt – от 0,002 до 0,01; Au – от 0,01 до 0,05; Ag – от 0,01 до 1,87; P – от 522 до 788; Cr – от 84 до 94; V – от 141 до 156; Ni – от 13 до 48; Cu – от 56 до 157; Zn – от 79 до 132; Pb – от 567 до 2546; As – от 133 до 502; Ba – от 362 до 432, что свидетельствует о высокой металлоносности рудовмещающей черносланцевой толщи. Полученные данные позволяют считать, что в пределах Авсандур-Ламардонского рудного поля выявлен новый для Северного Кавказа ранне-среднеюрский черносланцевый благороднометалльный с полиметаллами тип оруденения.

Ключевые слова: полиметаллическое и золото-сульфидно-кварцевое с ЭПГ оруденение; металлогенической зоны; золото-платиновый черносланцевый тип оруденения, Северный Кавказ.

Для цитирования: Гурбанов А.Г., Докучаев А.Я., Лексин А.Б., Газеев В.М., Гурбанова О.А., Лолаев А.Б., Оганесян А.Х. О возможности обнаружения промышленного ранне-среднеюрского полиметаллически-золото-платиноидного оруденения черносланцевого типа в Северной Осетии (часть 1). *Геология и геофизика Юга России*. 2020. 10 (4): 6 – 29. DOI: 10.46698/VNC.2020.37.45.001.

Благодарности: Работа подготовлена при поддержке гос. темы регистрационный номер AAAA-A19-119040190054-8 в КНИО ВНЦ РАН.

GENERAL AND REGIONAL GEOLOGY

DOI: [10.46698/VNC.2020.37.45.001](https://doi.org/10.46698/VNC.2020.37.45.001)

Original paper

On the possibility of detecting of industrial Early-Middle Jurassic polymetallic-gold-platinoid mineralization of the black-shale type in North Ossetia (Part 1)

A. G. Gurbanov^{1, 2}, A. Ya. Dokuchaev¹, A. B. Lexin¹, V. M. Gazeev^{1, 2},
O. A. Gurbanova³, A. B. Lolaev^{2, 4}, A. Kh. Oganessian^{2, 5}

¹Institute of Geology of Ore Deposits, Petrography, Mineralogy and Geochemistry RAS, 35 Staromonetny Lane, Moscow 119017, Russian Federation, e-mail: gurbanov@igem. ru;

²Vladikavkaz Scientific Center, Russian Academy of Sciences, 22 Markusa Str., Vladikavkaz 362027, Russian Federation, e-mail: gazeev@igem. ru;

³Lomonosov Moscow State University, 1 Lenin Hills, Moscow 119991, Russian Federation,;

⁴North Ossetian State University after K. L. Khetagurov, 44-46 Vatutina Str., Vladikavkaz 362025, Russian Federation;

⁵North Caucasian institute of Mining and Metallurgy (State Technological University), Ministry of Sciences and Higher Education of Russian Federation.
44 Nikolaeva str., Vladikavkaz 362021, Russian Federation

Received: 03.08.2020, revised: 16.09.2020, accepted: 01.10.2020

Abstract: Relevance. The Article is devoted to the problem of identifying the nature and causes of platinum- and palladium gold deposits: 1) in Precambrian black shale and carbonaceous strata of the Central zone of the Northern Tien Shan; 2) in the Urals, where the industrial significant gold is associated with island-arc formation and complexes superimposed volcano-plutonic belts of active continental margin; 3) in the North-East of Asia and the Far East, where the sialic profile of magmatic melt generation areas, in general, caused their regional geochemical tin-noble metal specialization; 4) in the black-shale strata of the Timos type on the iron ore deposits-giants of the Kursk magnetic anomaly (KMA) and the Voronezh crystal massif (VCM) of Central Russia. The most important component of ferruginous quartzites of KMA, VCM and the deposits of rich iron ores formed on them in the upper-visean crust of weathering and giant industrial products of mining enterprises are precious metals, which have become one of the largest non-traditional sources of selective and associated gold and platinum mining of the XXI century; 5) in the North Caucasus in the Devonian black shales of the Bolshaya Laba river minerals of native platinum were discovered, their platinum-bearing properties and prospects for detecting industrially significant ore objects in them were established. The results of complex studies of Devonian black shales in the zone of the Advanced ridge of the North Caucasus have shown that there is a single ultrabasic source for both Au and Pt, Pd. Mineral forms of the platinoid group in black shales and igneous rocks are often established only by microprobe or electron microscopic studies. **The aim of the research** is to expand the mineral resource base of the southern Federal district of the Russian Federation for precious metals. **Research methods** – conducting targeted representative testing of ore bodies, their host rocks and tailings material within the Avsandur-Lamardon ore field and the Fiagdon tailings reservoir, and their subsequent analysis by quantitative methods (assay and ICP MS analyses) to determine the gold content, platinum and EPG. **Results and discussion.** Until 2019, it was believed that in the North Caucasus, only carbon-containing Devonian black shales were potentially ore-bearing for precious metals. However, during the mineralogical and geochemical studies with quantitative methods (XRF and ICP MS) of industrial waste of the Fiagdon tailing pond, processing ores of the Kakadur-Khanikom and Kadat-Khampaladag polymetallic deposits located in the strip of development of carbonaceous black mudstones of lower Jurassic age, was first revealed elevated concentrations (in g/t) precious metals: Au – 0.05 to 0.35; Pd – from 0.042 to 0.049; Pt – from 0.07 to 1.29. Analysis of 4 samples of mudstones from different parts of the section of the lower-middle Jurassic black mudstone thickness revealed variations in their content (in g/t): Pd – from 0.003 to 0.01; Pt – from 0.002 to 0.01; Au – from 0.01 to 0.05; Ag – from 0.01 to 1.87; P – from 522 to 788; Cr – from 84 to 94; V – from 141 to 156; Ni – from 13 to 48; Cu – from 56 to 157; Zn – from 79 to 132; Pb – from 567 to 2546; As – from 133 to 502; Ba – from 362 to 432, which strongly indicates the high metal content of the ore-bearing black-shale strata. The data obtained, with high probability, allow us to assume that within Avsandur-Lamardon field identified a new for the North Caucasus of the early-middle Jurassic black shale with precious-metal polymetallic type mineralization.

Keywords: polymetallic and gold-sulfide-quartz mineralization with EPG, metallogenic zone; gold-platinous black-shale type of mineralization, North Caucasus.

For citation: Gurbanov A. G., Dokuchaev A. Ya., Lexin A. B., Gazeev V. M., Gurbanova O. A., Lolaev A. B., Oganessian A. Kh. On the possibility of detecting of industrial Early-Middle Jurassic polymetallic-gold-platinoid mineralization of the black-shale type in North Ossetia (Part 1). *Geologiya i Geofizika Yuga Rossii = Geology and Geophysics of Russian South*. (in Russ.). 2020. 10 (4): 6 – 29. DOI: 10.46698/VNC.2020.37.45.001.

Acknowledgments: This work was supported by State Topic registration number AAAA-A19-119040190054-8 in CRD VSC RAS.

Введение

Одной из фундаментальных проблем в области геологии золоторудных месторождений является выявление характера и причин платино- и палладиеносности золоторудных месторождений, установленной в том числе для ряда месторождений Дальнего Востока и Северо-Восточной Азии [Гончаров и др., 1995; Моисеенко и др., 2004]. Известно, что крупномасштабные концентрации Au объединяются по их типоморфным (геолого-генетическим) чертам в три группы объектов, сопряженных с: 1) «черными сланцами» (уникальные по запасам Au месторождения Сухой Лог, Наталка, Мурунтау и др.); 2) раннеколлизийным гранитоидным магматизмом (эталонные объекты – Мазерлонд, Кочкарское, Березовское, ряд объектов Аляски и др.); 3) зеленосланцевыми поясами архейских щитов (наиболее известные объекты – Колар, Хоумстейк, Хемло и др.).

Геохимическая специфика золоторудных месторождений черносланцевых толщ на элементы платиновой группы (ЭПГ, PGE), определенная разными методами [Буряк и др., 2001, 2005; Гончаров и др., 1995], требует установления минеральных форм платиноидов и минералов – типоморфных спутников платиноидов (к ним, прежде всего, относятся минералы никеля).

Выявление платиновой минерализации в рудах месторождения Сухой Лог [Лаверов и др., 1997] показывает возможность таких же находок и в рудах месторождений Востока России. Уровень концентрации Pt и Pd в рудах этих месторождений достигает вполне промышленных содержаний, что ставит вопрос об их специальном исследовании для возможного перевода в разряд комплексных золото-платиноидных месторождений. Это и обусловило проведение исследований, сконцентрированных на месторождениях в так называемых «черносланцевых толщах», содержащих до 2,5% углеродистого вещества. К таковым, в первую очередь на юго-восточном фланге Яно-Колымского пояса, относятся месторождения Наталка и Дегдекан. Как известно [Гончаров и др., 1995, 2002; Плюснина и др., 2003], руды этих крупных месторождений локализованы среди обогащенных углеродом терригенных отложений пермского возраста и содержат промышленные концентрации Pt, Pd и примесь Ir и Ru [Гончаров и др., 1995; Плюснина и др., 2003]. Однако до сих пор минеральные формы этих элементов не были установлены, и поэтому проблема их выявления весьма актуальна до настоящего времени.

Среди новых нетрадиционных крупнообъемных источников благородных металлов выделяется золото-платиноидное оруденение в железистых кварцитах, слагающих в пределах всех континентов Земли крупные и гигантские месторождения, дающие 57% мировой добычи железа и включающие около 5% общего числа золоторудных объектов. Важнейшим, но мало исследованным компонентом золотоносных железистых кварцитов являются металлы платиновой группы (МПГ).

В мегаблоке Курской магнитной аномалии (КМА) с железисто-кремнисто-сланцевой формацией нижнего карелия (в объеме курской серии) связан ряд уникальных золото-платиносодержащих супергигантских (Михайловское, Лебединское) и гигантских (Коробковское, Стойло-Лебединское) месторождений. Две трети разведанных запасов железистых руд России сосредоточено в этих пяти месторождениях, которые отрабатываются тремя ГОКаами, обеспечивая около 53% добываемого в стране железорудного сырья [Чернышов, 2004; Чернышов и др., 2011].

Нетрадиционные источники получения этих металлов установлены в сульфидных из «черных курильщиков» на дне океанов [Hodge et al., 1985], в техногенных

россыпях и хвостохранилищах [Sparrow, Woodcock, 1991], в регенерированных месторождениях, проявленных в пределах различных геологических провинций. Среди новых нетрадиционных крупнообъемных источников благородных металлов выделяется золото-платиноидное оруденение в золото-меднопорфировых месторождениях [Tarkian, Koopman, 1995; Werle et al., 1984].

Благороднометалльное оруденение черносланцевого типа

В результате целенаправленных геолого-поисковых исследований были установлены резко повышенные содержания благородных металлов в следующих регионах.

1) Докембрийские черносланцевые и углеродосодержащие толщи Центральной зоны Северного Тянь-Шаня. Известно, что образование черносланцевых толщ связано с полифациальными условиями осадконакопления и присутствием биогенных компонентов в качестве источников органического вещества – фосфора, серы и нередко кремнезема. Высокие концентрации последних привели к возникновению геохимических условий осаждения благородных, цветных, редких и других металлов [Асаналиев и др., 1999; Кабаев, 2005; Кабаев и др., 2003; Калмурзаев и др., 1992]. Полифациальность образования черносланцевой формации установлена как при сравнении формаций из разных районов мира, так и при исследовании разрезов докембрийских и палеозойских эпох киргизской части Тянь-Шаня. Обобщение данных о закономерностях размещения и условиях формирования оруденения в отдельных крупных рудоносных зонах, специализированных на благородные, редкие и другие металлы в докембрийских толщах Северного Тянь-Шаня показало [Кабаев, 2005], что древние геокомплексы в пределах известных структурно-формационных зон Северного Тянь-Шаня расчленены на ряд формаций не только по литологическому составу, типу стратификации, условиям образования, степени метаморфизма, геотектоническим этапам и стадиям становления, но и по рудно-геохимической специализации. Докембрийские толщи, распространенные в Центральной зоне Северного Тянь-Шаня, содержат отдельные прослои и линзы графитизированных сланцев амфиболит-гнейсово-карбонатной подформации, по объему соответствующей куперлисайской, онарыкской, тегерментинской и другим свитам, толщи которых характеризуются полиметаллически-редкометалльно-редкоземельно-золотой, золото-сульфидной и сульфидной минерализацией с повышенным содержанием золота.

Отложения свит, формирующих амфиболит-терригенно-карбонатные и гнейсово-мигматит-терригенные формации, составляют Актюз-Боординский структурно-формационный блок дорифейского метаморфического фундамента (карелиды?), а также Иссык-Атинский и Западно-Кунгейский блоки байкальской стабилизации. В пределах этих структур широко развиты рудные месторождения, рудопроявления и интенсивные геохимические аномалии благородных, редких, редкоземельных и цветных металлов.

2) На Урале промышленно значимая золотоносность связана с колчеданосными структурами (островодужные образования) и вещественными комплексами наложенных вулканоплутонических поясов активной континентальной окраины.

Крупномасштабные месторождения золота «черносланцевого» типа на Урале характеризуются следующими общими чертами [Ананьев, Коробейников, 2009; Бу-

ряк, 1981; Додин и др., 2007; Константинов и др., 2000; Сазонов и др., 2010]: а) они приурочены к кольцевым тектоническим структурам (с ними связаны характерные «рисунки» развития гидросетей); б) они контролируются шовными зонами, часто имеющими дуплексный характер; в) рудно-магматические системы имеют длительное (десятки млн. лет) дискретное развитие, с постепенным концентрированием от кларковых содержаний и незначительных аномалий к образованию промышленных рудных тел; г) месторождения локализованы в породах, метаморфизованных в условиях не выше зеленосланцевой фации.

Обычно крупные месторождения формируются в двух геодинамических обстановках: в рифтогенной возникают концентрации на уровне промежуточных коллекторов, а в коллизионной происходит «дозревание» промежуточных коллекторов до месторождений.

«Черные» сланцы на Урале преимущественно формировались в рифтогенной и коллизионной геодинамических обстановках. Кольцевые структуры для площадей их развития здесь не характерны: они контролируются линейно вытянутыми зонами. Длительность развития золотоносных структур достигает 80 млн лет. Для Урала установлено, что более 85% золоторудных объектов (включая и локализующиеся в «черных» сланцах) приурочены к зонам развития зеленосланцевого метаморфизма.

Содержащее платиноиды золотое оруденение в «черных» сланцах распространено на Урале довольно широко и охарактеризовано в работах [Баранников, 2006; Великанов, Сазонов, 2010; Додин и др., 2007; Ковалев, 2008; Сазонов и др., 2011 и др.]. Установлено, что большинство золоторудных объектов приурочено к шовным зонам, часто имеющим рифтогенную (она проявлялась 1290, 560 и 480 млн лет тому назад) и коллизионную (которая проявлялась 385-240 млн лет тому назад) природу. Считается [Ананьев, Коробейников, 2009], что на Южном и Среднем Урале имеются предпосылки для открытия золото-платиновой провинции с крупными рудными узлами.

Опыт прогнозной оценки промышленной значимости объектов «черносланцевой» формации показывает, что она может быть сделана только после установления глубинного геологического строения провинции, картирования метаморфических фаций и метасоматических формаций, а также формационного анализа магматитов.

Установленное трехуровневое концентрирование золота в «черных» сланцах позволяет выделить три направления для рассматриваемой проблемы [Сазонов и др., 2010]. Первое – детальное изучение фациального состава субстанций черносланцевого комплекса и сопряженных с ним проявлений магматизма для выявления возможных источников рудного вещества и флюидов. Второе – установление для золотоносных площадей степени метаморфизма пород «черносланцевого» комплекса. Третье – формационный анализ интрузивного комплекса габбро-диорит-гранитного состава, так как его рудно-магматическо-метаморфическая система «доводит» концентрирование золота во «вторичных коллекторах» до промышленных содержаний [Ананьев, Коробейников, 2009; Жмодик и др., 2008; Константинов и др., 2000; Сазонов и др., 2010 и др.].

3) Северо-восточная Азия и Дальний Восток. В целом, сиалический профиль областей генерации магматических расплавов на северо-востоке Азии обусловил их региональную геохимическую олово-благороднометалльную специализацию. Исследования по проблеме источника вещества и флюида показали, что рудное вещество, скорее всего, является производным нижней коры, а для флюидов наиболее

вероятен гетерогенный источник с преобладанием верхнекорового [Гамянин, Горячев, 2000; Горячев, 2003; Горячев, Гамянин, 2000; Горячев и др., 2004]. Здесь выделяют три региональные рудно-магматические системы (РМС): Северную (Олойско-Чукотскую), Яно-Колымскую и Верхоянскую; предполагается наличие еще одной РМС, расположенной вдоль Адыча-Тарынской зоны.

Особенности платиноидной минерализации и сопутствующих минералов в рудах месторождений Яно-Колымского золоторудного пояса (РМС) позволяют считать, что все они связаны с процессами «разрушения» магматических источников основного – ультраосновного составов и с накоплением их продуктов в пермских осадках. Крупных тел базитов и ультрабазитов в до-пермских и пермских отложениях обрамляющих их тектонических блоков пока не обнаружено, но отмечается тесная ассоциация ЭПГ-минерализации с золотоносными эпигенетическими метасоматитами.

Сопоставление этих месторождений с объектами современной гидротермальной активности Восточно-Чукотского моря (донными отложениями, существующими в сходных тектонических условиях) дало основание предположить [Гончаров и др., 2004], что источником ЭПГ в осадочных пермских отложениях северо-восточной Азии были сейсмоактивные троговые зоны на дне пермского моря. Скорее всего, обогащенность тектонических зон в разрезах пермских отложений Ni, Cr и Co свидетельствует о металлогенической роли таких сейсмоактивных зон и позволяет считать их каналами, подводящими флюиды с ЭПГ, Ni, Cr, Au в придонные слои пермского моря, с формированием в осадках горизонтов, первично обогащенных благородными металлами.

Важным достижением при изучении сложного Au-Ni-PGE оруденения в черносланцевых толщах было выявление минеральных форм платиноидов на месторождении Дегдекан (рутениридосмин, осмирид, лаурит, иридарсен, осмий самородный) и их минеральных ассоциаций в рудах, послужившее основой для разработки технологии извлечения данных минералов вместе с золотом и увеличившее ценность руд этого типа. В итоге была разработана следующая модель образования руд: а) первичное накопление благородных металлов и никеля в конкретных горизонтах осадков пермского моря, в связи с троговыми зонами пассивной континентальной окраины; б) последующее перераспределение при метагенезе и метаморфизме на раннеорогенном этапе в позднем мезозое; в) вынос полезных компонентов из нижних горизонтов осадочного чехла метаморфогенно-магматогенными флюидами при орогенезе с их отложением в приразломных зонах в синнадвиговый и синсбросовый этапы рудогенеза [Горячев и др., 2004]. Установлена связь благородных металлов с никелем и показано принципиальное присутствие ЭПГ-минерализации в «черносланцевых» рудах золоторудных месторождений Яно-Колымского пояса, что расширило перспективы таких месторождений как комплексных золото-платиноидных.

Платиноносность золоторудных месторождений в черносланцевых толщах Дальнего Востока известна почти четверть века [Гончаров и др., 1995; Моисеенко и др., 2004], поэтому важно было выявить источник углерода – это первично углеродистые толщи или метасоматоз? Работами последних лет показана роль углеродистого вещества как геохимического барьера, концентрирующего совместно золото, платину и палладий. Отмечена тесная связь платиноидов в рудах с сульфидами [Буряк и др., 2002а, б; Гончаров и др., 2004; Плюсина и др., 2003] и выявлен новый

тип золото-платиноидного оруденения, связанного с углеродистым метасоматозом [Ханчук и др., 2004], что свидетельствует о не случайности повышенной платиноносности золотых руд месторождений, локализованных в черносланцевых толщах. Геохимическая платиноносность золоторудных месторождений черносланцевых толщ, определенная разными методами [Буряк, 2003; Буряк и др., 2002а, 2005; Гончаров и др., 1995], требует установления минеральных форм платиноидов и минералов – типоморфных спутников платиноидов.

Предложено направить дальнейшие усилия на изучение микроминералогии этих руд как базы для разработки конкретных технологических схем извлечения благородных металлов и на установление природы геохимических аномалий ЭПГ в рудах наталкинского и ветренского типов [Горячев и др., 2004].

4) Черносланцевые толщи тимского и кшенского типов на железорудных месторождениях-гигантах Курской магнитной аномалии (КМА) и Воронежского кристаллического массива (ВКМ). Важнейшим компонентом железистых кварцитов КМА и сформировавшихся по ним залежей богатых железных руд доверхневизейской коры выветривания, а также гигантских по объему промышленных продуктов горнорудных предприятий являются благородные металлы – крупнейший нетрадиционный источник селективной и попутной золото- и платинодобычи XXI века. Среди разнообразных по составу железных руд впервые выделено [Чернышов, 1996а, 2004, 2011; Чернышов и др., 2011] шесть генетических типов золото-платинометалльного оруденения: осадочно-метаморфогенный, метаморфогенно-метасоматический (стратиформный), гидротермально-метасоматический, гипергенно-метасоматический, осадочный (базальные горизонты, залегающие на богатых мармитовых рудах) и техногенный. Каждый тип характеризуется своими условиями локализации, морфологией и масштабами рудных залежей, типом минерализации, содержанием благородных металлов и практической значимостью. В связи с тем, что статья посвящена черносланцевому типу Au-Pt оруденения, ниже рассмотрена характеристика типов руд КМА и ВКМ, ассоциирующих с углеродсодержащими «черными» сланцами.

Осадочно-метаморфогенный тип развит на обширных площадях среди железистых кварцитов на всех железорудных месторождениях с низкими содержаниями Au (0,03 г/т) и ЭПГ (до 0,05 г/т). Кроме того, он также встречается в нижней и верхней сланцевых подсвитах коробковской свиты курской серии. Этот тип минерализации представляет интерес для попутного извлечения Au и ЭПГ из продуктов переработки железистых кварцитов.

Стратифицированные высокоуглеродистые комплексы и железистые кварциты раннего докембрия широко распространены и являются высоко перспективным источником золото- и платинодобычи. В докембрийском фундаменте центрального региона России (Курский и Воронежский железорудные районы) сосредоточено 60 железорудных объектов, в том числе отрабатываемые супергигантские и гигантские по запасам месторождения железистых кварцитов и сопровождающих их углеродистых сланцев, в которых важнейшим компонентом являются благородные металлы [50]. Среди них выделен ряд формационно-генетических типов золото-платинометалльного оруденения, ассоциирующих с железными рудами, черносланцевыми толщами и их метасоматитами [Чернышов, 2004, 2007]. Установлен многокомпонентный полиминеральный состав оруденения (более 60 минералов), включая 30 минеральных фаз ЭПГ и Au, наличие повышенных содержаний благородных ме-

таллов в рудообразующих сульфидах, сульфоарсенидах, теллуридах, антимонидах [Чернышов, 2011]. Доказана полигенная природа источников рудного вещества и предложена полихронная модель формирования руд.

Кроме стратифицированных золото-платиносодержащих залежей на контакте стойленской и коробковской свит и залегающих среди железистых кварцитов внутрирудных сланцев, интерес представляют высокоуглеродистые сланцы и метасоматиты оскольской вулканогенно-осадочной серии, перекрывающей курскую. Эти отложения, совместно с курской серией представляющие единый палеопротерозойский структурно-формационный комплекс протоплатформенного этапа и последующего континентального рифтогенеза и коллизии, явно проявляются в Старооскольском железорудном районе с известными сверхкрупными и крупными месторождениями КМА.

Характерными особенностями подобных золото-платиноносных структурно-формационных зон являются [Буряк, 2002б; Додин и др., 2007; Константинов и др., 2000; Платина России, 2005; Рудашевский и др., 1995; Холин, 2001; Чернышов, 1996а, 2007; Чернышов, Попова, 2006; Чернышов и др., 1999]: а) полицикличность и многостадийность их развития с резким преобладанием терригенно-осадочных (в том числе мощных железорудных) отложений на ранних стадиях (курская серия) и возрастающая роль углеродистых вулканогенно-осадочных и вулканических образований (оскольская серия) на поздних стадиях их формирования; б) широкое развитие дифференцированных в разной мере вулканоплутонических ассоциаций с пикрит-толеит-базальтовыми и базальт-андезит-дацитовыми вулканиками (оскольская серия) и магматитами ультраосновного-основного, габбро-диорит-гранодиоритового и гранитоидного составов с отчетливой металлогенической специализацией на Cu, Pb, Zn, Au, Ag, ЭПГ, Р, В, РЗЭ; в) высокая степень интенсивности проявления складчатости и взбросо-надвиговых перемещений, сложный структурный рисунок разломов различных порядков, с образованием зон объемного катаклаза, являющихся контролирующими элементами рудообразующих систем; г) низкоградиентный тип метаморфизма в условиях эпидот-амфиболитовой и в большей мере зеленосланцевой фаций, способствующий перераспределению и накоплению рудного вещества и широкому развитию разнообразных по составу метасоматитов, сопровождающихся комплексным золото-платинометалльным оруденением тимского и кшенского типов; последние совместно с благороднометалльно-содержащими межрудными сланцами и подстилающими роговскую свиту углеродистыми толщами стойленской свиты образуют, по существу, единую длительно формирующуюся черносланцевую рудную формацию [Чернышов, 1996б, 2007; Чернышов, Попова, 2006].

Оруденение тимского типа, наиболее полно проявившееся в крупной (протяженностью 130 км при ширине 30-50 км) Тим-Ястребовской структуре КМА, характеризуется: локализацией в нижней сульфидизированной углеродистой терригенно-осадочной части разреза тимской свиты оскольской серии; многоуровневым (3-7 горизонтов, мощностью от первых метров до 25-30 м) размещением; высокими концентрациями (1,5-34,6 г/т) ЭПГ и Au; отчетливой корреляционной связью их с С, S и рядом петрогенных и малых (Ni, Cu, Co, Cr, Zn, Ti, V, Р и др.) элементов; преимущественно базальтоидным типом распределения ЭПГ ($Pd > Pt > Rh > Ru > Ir > Os$); высокой степенью концентрирования благородных металлов в наиболее тонкозернистой (<0,06 мм) сульфидно-углеродистой фракции, в которой их концентрации

многократно (в 15-16 раз) превышают содержания в исходных (рудовмещающих) породах.

Стратиформное метаморфогенно-метасоматическое оруденение приурочено к зонам контакта толщи углеродистых сланцев верхнестойленской подсвиты с перекрывающими безрудными и слабо рудными кварцитами нижней железорудной подсвиты коробковской свиты курской серии и к межрудным углеродсодержащим сланцам с син- и эпигенетической сульфидной минерализацией. Рудные залежи имеют пирит-пирротин-халькопирит-галенитовый состав и повышенные содержания Au (0,54-6,18 г/т), Pt (0,12-0,30 г/т) и Pd (0,58-0,77 г/т). С этим типом связан крупнообъемный по запасам тип благороднометалльного оруденения, приуроченный в Михайловском рудном районе к протяженной (более 70 км) и мощной (от 40 до 90 м) зоне контакта ритмично-слоистой толщи углеродсодержащих сланцев стойленской свиты с перекрывающими безрудными и слабо рудными кварцитами нижней железорудной толщи курской серии. В разной мере это проявляется в месторождениях Старооскольского рудного узла (Лебединское, Стойленское, Коробковское, Стойло-Лебединское), которые являются самостоятельными золото-платиноидными объектами для селективной отработки.

Техногенный (россыпной) тип включает благороднометалльное оруденение в различных продуктах переработки железных руд (общие хвосты, скважинные пробы из хвостохранилища, пробы всех стадий магнитной сепарации и флотации), накопленных действующими горно-рудными предприятиями (ГРП) КМА (Михайловское, Лебединское, Стойленское, Стойло-Лебединское, Коробковское). Изучение золотоносности железистых кварцитов и богатых железных руд для КМА является одной из актуальнейших задач, так как действующие ГРП КМА перерабатывают более 50% железных руд России и выбрасывают в отвалы большое количество золото- и платиносодержащих минералов. Повышенные концентрации благородных металлов установлены в двух крупнейших месторождениях КМА – Михайловском и Лебединском.

В совокупности все эти типы золото-платинометалльного оруденения являются, вместе с тем, первичным источником золота и платиноидов, поступающих в гигантские (свыше 1,3 млрд т) хвостоотвалы ГОКов. Хвостоотвалы, в процессе более чем 40-летней добычи железных руд КМА, стали представлять собой новый, техногенный по своей природе, крупный самостоятельный объект золото-платиновой добычи. Наиболее обогащены благородными металлами пески гидроциклонов (ЭПГ до 1,5 г/т, Au=25,0-43,54 г/т) и немагнитная фракция (Au=15 г/т, Pt=0,2 г/т, Pd=0,4 г/т).

Установлено, что на распределение, степень концентрирования и формы нахождения золота и платиноидов существенное влияние оказывает место парагенезисов сульфидов в общем длительном процессе формирования благороднометалльного оруденения в высокожелезистых рудообразующих системах. На Михайловском месторождении в составе сульфидов золото установлено в пиритах из рудного щелочного метасоматита (5,11 г/т), слюдистого железистого кварцита (1,43 г/т) и кварцевой жилы (0,05 г/т). Пирит из кварцевой жилы обогащен селеном (1556,3 г/т), а в пирите из щелочных метасоматитов установлены повышенные содержания ртути (117,9 г/т) и мышьяка (9709 г/т).

Сульфиды на Лебединском месторождении характеризуются многообразием форм проявления пирита и пирротина и сложными взаимоотношениями с оксидами (магнетитом, гематитом) и силикатами.

Золото-платинометалльное оруденение железорудных месторождений КМА характеризуется сложным полиминеральным (более 60 минералов) и многокомпонентным составом [Чернышов, 2011]. Определяющими особенностями благороднометалльного оруденения являются многообразие форм концентрирования и широкое развитие собственных минеральных фаз ЭПГ, Au и сопутствующих им элементов (Ag, Te, Bi).

Проведенные исследования золото-платинометалльных объектов позволили выявить основные закономерности пространственного размещения разномасштабных благороднометалльных объектов в палеопротерозое [Чернышов, 1996б, 2004, 2011; Чернышов и др., 2011 и др.].

Михайловская площадь вмещает золото-платинометалльные пункты минерализации как в конгломератах краевых частей палеопротерозойской синклинали структуры, так и в железистых кварцитах и безрудных сланцах. На территории Михайловского рудного района находятся пять месторождений – Михайловское, Ново-ялтинское, Курбакинское, Яценское и Дичнянско-Реутецкое, а также 38 участков и аномалий. Исследованиями последних лет установлен уникальный формационный тип – золото-палладийсодержащая железорудная формация КМА, метасоматические благороднометалльные руды которой контролируются Хальзеево-Михайловской тектонической зоной. Прогнозные ресурсы золота в самостоятельных рудных телах в контуре карьера оцениваются как соответствующие мелким и средним месторождениям. Оскольская площадь (Старооскольский железорудный район) хорошо изучена (здесь исследовано более 30 участков и геофизических аномалий) и отрабатывается карьерами (Лебединское, Стойло-Лебединское и Стойленское месторождения). На Коробковском месторождении добыча железистых кварцитов ведется шахтным способом; здесь разведаны и подготовлены к эксплуатации Чернянское и Приоскольское месторождения, в резерве находятся Салтыковское, Осколецкое, Погромецкое, Огибнянское, Северо-Волотовское и Панковское месторождения. Для золото-платинометалльных проявлений Оскольской площади характерна пространственная ассоциация с дайками и интрузивными телами диорит-гранодиоритового состава. В каждой из выделенных площадей развития благороднометалльной минерализации, в разрезах эпиплатформенного типа с железистыми кварцитами и углеродсодержащими межрудными сланцами, могут быть выявлены мелкие и средние по запасам месторождения.

Наиболее перспективными в отношении благородных металлов являются железистые кварциты и сопутствующий им комплекс углеродсодержащих внутрирудных сланцев, в связи с попутной добычей золота и платиноидов при разработке уникальных железорудных месторождений. Общие ресурсы благородных металлов по Михайловскому месторождению составляют 1300 т.

5) На Северном Кавказе до 80-х годов прошлого века из благородных металлов были известны золото и серебро. Мелкие аллювиальные россыпные объекты золота в долинах рек Белая, Большая Лаба, Уруп, Зеленчук, Кубань, Малка отрабатывались до середины 50-х годов артелями. Попутное золото извлекалось из пиритового и других концентратов Урупского медно-колчеданного с полиметаллами месторождения, а также из медно-висмутового концентрата Тырныаузского вольфрамово-молибденового комбината. Серебро попутно извлекалось из свинцового концентрата Садонского свинцово-цинкового комбината.

После исследований и положительной оценки перспектив платиноносности девонской толщи углеродсодержащих сланцев Северного Кавказа [Лазаренков и др., 1998], круг благородных металлов расширился (микрозондовым анализом установлены минералы – рутениридосмин и самородная платина [Богущ и др., 2017]).

Обычно минеральные формы группы платиноидов в черных сланцах и в магматических породах визуально и микроскопически не фиксируются из-за их тонкодисперсного состояния, а их наличие фиксируется при микрозондовых или электронно-микроскопических исследованиях. Аналогичная ситуация типична для месторождений благородных металлов в черносланцевых толщах [Гурская, 2000; Новожилов, Гаврилов, 1999; Парада, 2009; Сазонов и др., 2011; Carville et al., 1990; Crauch et al., 1991; Large et al., 2007].

В черных сланцах р. Большая Лаба были обнаружены минералы самородной платины и установлена платиноносность сланцев девона [Богущ, 2001; Давыдов и др., 2009]. Результаты комплексных исследований черных сланцев Северного Кавказа показали, что существует единый ультрабазитовый источник двух групп благородных металлов как для Au, так и для Pt, Pd.

Перспективность выявления промышленных платиноворудных объектов на Кавказе была теоретически обоснована в работах С.Г. Парады [Чернышов, 2007, 2011].

В балке Грушовой (бассейн р. Большая Лаба) И.А. Богущем с соавторами выявлено наличие благородных металлов (Au, Pt, Pd) черносланцевого типа в концентрациях и объемах, близких к промышленным [Богущ и др., 2015, 2016а, б, 2017; Буряк и др., 2002а]. Установлена идентичность наборов благородных металлов в сланцах и ультрабазитах. Результаты комплексных исследований благородных металлов позволяют выделить Северный Кавказ в качестве новой благороднометалльной провинции Российской Федерации [Богущ и др., 2017].

Геологическая характеристика района развития ранне-среднеюрского золото-платинового оруденения черносланцевого типа в рудных полях полиметаллических месторождений Кадат и Какадур (Северная Осетия-Алания)

Как было показано выше, в черных сланцах р. Большой Лабы была обнаружена самородная платина и установлена платиноносность сланцев девона [Богущ, 2001; Богущ и др., 2010, 2015, 2016а, б; Буряк и др., 2002а]. Доказана потенциальная рудоносность на благородные металлы (Au, Pt, Pd) углеродсодержащих девонских черных сланцев (в рудной зоне Грушовой суммарное содержание трех металлов достигает 1 г/т). Ультрабазиты Беденского массива рассматриваются как источник благородных металлов для вмещающих их углеродсодержащих девонских черных сланцев [Богущ и др., 2017]. Минералогическое, петро-геохимическое изучение черных сланцев показало их генетическую связь с эрозией ультраосновных массивов [Богущ и др., 2017; Буряк и др., 2002а].

Следовательно, до 2019 г. считалось, что на Северном Кавказе потенциально рудоносными на благородные металлы являются только углеродсодержащие девонские черные сланцы. Однако, при проведении минералого-геохимических исследований количественными методами (XRF и ICP MS с переводом проб в раствор в автоклаве из-за высокого содержания серы сульфидов в пробах) промышленных от-

ходов (ПО) Фиагдонской обогатительной фабрики (ФОФ), перерабатывавшей руды Какадур-Ханикомского и Кадат-Хампаладагского полиметаллических месторождений, расположенных в полосе развития углеродсодержащих черных аргиллитов нижне-среднеюрского возраста, впервые были выявлены повышенные концентрации благородных металлов (БМ) [Гурбанов и др., 2019б].

Промышленные отходы захоронены в Фиагдонском хвостохранилище (ФХ) длиной до 800 м при ширине от 50 и до 200 м, расположенном в пойме долины р. Хаником-дон. Для получения представительных данных о характере распределения базовых металлов в объеме хвостов была проанализирована 71 проба из керна трех сважин, пробуренных на всю мощность ФХ (с востока на запад – 10 м, 22 м и 31 м) и 24 пробы из поверхностного слоя ПО на глубину до 0,3 м по профилям [Гурбанов и др., 2019а]. На первом этапе исследований пока проанализировано 5 проб керна из нижних частей разреза ПО. В них содержания БМ (в г/т) варьируют в пределах: Au – от 0,05 до 0,35; Pd – от 0,042 до 0,049; Pt – от 0,07 до 1,29 [Гурбанов и др., 2019б]. Вслед за этими пробами были проанализированы 4 пробы аргиллитов из разных частей разреза черных аргиллитов нижне-среднеюрского возраста. В них содержания БМ и базовых металлов (в г/т) варьируют в пределах: Pd – от 0,003 до 0,01; Pt – от 0,002 до 0,01; Au – от 0,01 до 0,05; Ag – от 0,01 до 1,87; P – от 522 до 788; Cr – от 84 до 94; V – от 141 до 156; Ni – от 13 до 48; Cu – от 56 до 157; Zn – от 79 до 132; Pb – от 567 до 2546; As – от 133 до 502; Ba – от 362 до 432.

Полученные данные, с большой долей вероятности, позволяют считать, что в пределах Авсандур-Ламардонского рудного поля, вмещающим полиметаллические месторождения Какадур-Хаником, Кадат-Хампаладаг и многочисленные рудопроявления, выявлен новый для Северного Кавказа ранне-среднеюрский черносланцевый благороднометалльный с полиметаллами тип оруденения [Гурбанов и др., 2019б].

Отметим, что с 2007 по 2009 гг. ОАО «Севостгеологоразведка» проводила на территории Горной Осетии (РСО-А) поисковые работы на золото-серебряный и золото-сульфидный типы оруденения, включающие детализационные работы с проходкой поверхностных горных выработок и их бороздовым опробованием в участках выявленных рудных зон, пробирный анализ этих проб на золото, а также проведение геофизических и геохимических площадных съемок. Здесь важно подчеркнуть, что геологическими заданиями, а соответственно и проектами на проведение поисковых работ (в отчетах Давыдов и др., 2009; Туаев, 2019) не предусматривались анализы на определение в пробах содержаний платины и элементов платиновой группы. В итоге, в пределах Авсандур-Ламардонского рудного поля выделена наиболее перспективная Какадур-Ламардонская рудная зона с вариацией содержания золота от 0,1 г/т до 3,0 г/т. В пределах этого рудного поля выделено еще шесть рудоносных зон протяженностью 500-1600 м с повышенными содержаниями Au и Ag (Давыдов и др., 2009).

Характеристика золоторудных зон, выявленных в пределах Авсандур-Ламардонского рудного поля

В пределах Какадурского (рис. 1) и Ламардонского участков поисковых работ, по данным геологического картирования в масштабе 1:5000, были существенно уточнены границы ранее выявленных рудных зон и их апофиз с актуализацией информации о ее морфометрических параметрах. Установлено существенное умень-

шение мощностей рудных зон в сравнении с данными предшествующих работ (Давыдов и др., 2009). По уточненным границам, в пределах рудных зон и их фрагментов (рудная зона Какадур-Северный, Какадур-Южный, апофиза Центральная, Северная, Цатадонские жилы) горно-буровыми работами, в комплексе с опробованием и лабораторно-аналитическими исследованиями, дана оценка золотоносности выявленных объектов золоторудной минерализации с поверхности и на глубину до 300 м (Туаев, 2019).



Рис. 1. Схематическая геологическая карта Какадурского участка (Туаев, 2019). /
Fig. 1. Schematic geological map of the Kakadurskiy district (Tuayev, 2019).

В рудной зоне Какадур-Северный, по данным рудных сечений с поверхности, оконтурено и прослежено по латерали на 1600 м и по падению до 300 м три рудных тела с истинной мощностью от 0,9 до 10,8 м со средневзвешенными на пересечениях содержаниями (в г/т): Au от 0,52 до 3,76, Ag от 1,0 до 59,28; Cu от 0,15 до 1,10 масс.%, Zn от 0,11 до 5,27 масс.%, Pb от 0,10 до 3,78 масс.%.

По данным бурения поисковых скважин №№ 2 и 3 на двух профилях с шагом в среднем 400 м выявленное с поверхности золотое оруденение прослежено на глубину до 300 м. При этом установлено общее незначительное снижение с глубиной параметров оруденения как по мощности, так и по содержаниям рудных элементов.

По рудной зоне Какадур-Южный, по данным рудных сечений с поверхности, оконтурено и прослежено по латерали на 1650 м одно рудное тело с истинной мощностью 13,6 м со средневзвешенными на пересечениях содержаниями (в г/т): Au=1,35, Ag от 1,0 до 59,28; Cu от 0,15 до 1,10 масс.%, Zn от 0,11 до 5,27 масс.%, Pb от 0,10 до 3,78 масс.%.

По апофизе Северной горно-буровыми работами выделено, оконтурено и прослежено по латерали на 600 м и по падению до 300 м одно рудное тело с истинной мощностью от 5,0 до 13,4 м и со средневзвешенными на пересечении содержаниями (в г/т): Au от 1,97 до 2,32, Ag от 1,0 до 5,40. Содержания Cu, Zn, Pb исчисляются в первых долях процента как на поверхности, так и на глубине.

По апофизе Центральной горно-буровыми работами выделено, оконтурено и прослежено по латерали на 1200 м и по падению до 300 м одно рудное тело с истинной мощностью от 2,0 до 10,8 м со средневзвешенными на пересечении содержаниями (в г/т): Au от 2,63 до 2,70, Ag от 2,0 до 6,2. Содержания Cu, Zn, Pb исчисляются в первых долях процента по всему вскрытому разрезу.

По Цатадонским жилам горными работами выделено, оконтурено и прослежено по латерали на 520 м и по падению до 200 м одно рудное тело с истинной мощностью от 7,9 до 8,9 м со средневзвешенными на пересечении содержаниями Au 2,58 г/т и Ag 3,6 г/т. Содержание элементов халькофильной группы характеризуются низкими концентрациями по всему вскрытому разрезу.

По всем перспективным рудным зонам дана оценка сплошности распространения золотого оруденения как с поверхности, так и на глубину до 300 м.

Породам, вмещающим линейное штокверковое оруденение, присуща темная окраска за счет присутствия тонкодисперсного углеродистого вещества, содержание которого достигает 3-5% от объема породы. Участки развития сингенетических сульфидов железа, образующих рассеянную вкрапленность или отдельные желваковые скопления, по-видимому, указывают на наличие в бассейне осадконакопления мест конседиментационных впадин с застойным восстановительным режимом осадконакопления. Особенностью рудовмещающей толщи, осложненной рядом пликтивных и дизъюнктивных нарушений высоких порядков, является наличие в ней, по данным документации отдельных лентовидных горизонтов, сферосидеритовых и часто пиритизированных конкреций.

Линейная зона золоторудной штокверковой минерализации связана с объемным окварцеванием, с кварцевыми жилами, брекчиями с кварцевым цементом в углеродистых аргиллитах, алевролитах и с развитием аргиллизации, хлоритизации, пиритизации, лимонитизации и полиметаллической минерализации.

Характерной структурной особенностью вскрытых разрезов на участках Какадур и Ламардон является смена зон дробления на серии сближенных плоскостей скольжения, зоны расщепления, глинистые тектонические швы и единичные «зеркала» скольжения. Это обуславливает даже на коротких интервалах рудных тел «трансформацию» массивных рудных линз и жил, а также жил с алевролитовой брекчией в зоны прожилкового и штокверкового оруденения, возможно, указывая на наличие конвекции вадозных вод из вмещающих аргиллитов. Изредка линзы и жилы сменяются отдельными прожилками и линзовидными гнездами, развивающимися на перегибах одиночных плоскостей скольжения.

В качестве основных прогнозно-поисковых критериев и признаков выделены геотектонический, формационный, литолого-стратиграфический, структурно-тектонический, метаморфический, гидротермально-метасоматический, минералогический, геохимический и геофизический.

Геотектонический. Палеовпадины в борту глубоководной части киммерийского рифта, осложненной конседиментационной тектоно-магматической активизацией.

Формационный. Рифтогенный комплекс ранне-среднеюрских терригенных флишеидных отложений значительной мощности (более 2000 м) с существенной примесью вулканогенного материала и повышенной фоновой металлоносностью пород.

Литолого-стратиграфический. Стратоуровень тоар-ааленских терригенных флишеидных отложений, в пределах которого сосредоточено основное число золотосодержащих и золоторудных проявлений района, непосредственно подстилается комплексом плинсбах-тоарских терригенных пород, отличающихся наиболее высокой металлоносностью пород и, возможно, повышенной золотоносностью.

Структурно-тектонический. Территории значительно проявленных тектонических (складчатых и разрывных) преобразований комплексов пород; рудоконтролирующие зоны интенсивного дробления, трещиноватости и рассланцевания рудовмещающих отложений.

Метаморфический. Область наиболее значительных динамометаморфических или дислокационных метаморфических преобразований пород.

Гидротермально-метасоматический. Околорудные метасоматиты в пределах золотоносных минерализованных зон имеют зональное строение, от внешних окварцевания, серицитизации, хлоритизации и сульфидизации к внутренним – окварцеванию и сульфидизации.

Минералого-геохимический. Проявления золотосодержащей полиметаллической и золото-сульфидно-кварцевой минерализации. Типичные рудные минералы ассоциации – пирит, галенит, сфалерит, арсенопирит, халькопирит и др., нерудные – кварц, кальцит, доломит. Основной полезный компонент руд – Au. Попутными компонентами в рудах являются Ag, Pb, Cu и Zn, из вредных компонентов – мышьяк.

Геохимический. Литохимические аномалии Au, совпадающие с аномальными полями элементов-спутников – Ag, As, Cu, Pb, Zn.

Геофизический. Линейные аномалии «вызванной поляризации», отвечающие линейным зонам штокверкового золото-сульфидно-кварцевого оруденения.

По данным петрографического, минерографического и минералогического изучения вещественного состава образцов золото-сульфидно-кварцевых руд и околорудных метасоматитов установлено, что они относятся к золото-мышьяковисто-полиметаллическому типу руд с тонкодисперсным (упорным) золотом. Наиболее вероятными минералами-носителями золота являются арсенопирит и мышьяковистый пирит, серебра – галенит.

Результаты геолого-экономической оценки прогнозных ресурсов золота категорий P_1 и P_2 показали возможность рентабельной отработки 43% рудной массы, оконтуренной по борту 0,5 г/т открытым способом, и 57% – подземным штольневым способом.

Принятая в соответствии с группой и типом месторождений плотность поисковой сети и фактическая степень изученности сырья позволяет оценить выявленные ресурсы по категориям P_1 и P_2 . Согласно протоколу апробации прогнозных ресурсов ФГБУ «ЦНИГРИ» № 23 от 25.12.2019 г., прогнозные ресурсы золота категории P_1 составляют 23,1 т, при содержании золота 1,84 г/т и P_2 –25,9 т, при содержании золота 1,74 г/т (Туаев, 2019).

Выводы

1. На основании анализа целенаправленных исследований разновозрастных рудных объектов (докембрийские черносланцевые углеродсодержащие толщи Центральной зоны Северного Тянь-Шаня; черносланцевые толщи Урала, северо-вос-

точной Азии и Дальнего Востока; черносланцевые толщи тимского и кшенского типов на железорудных месторождениях-гигантах в Центральной России (КМА, ВКМ); углеродсодержащие девонские сланцы Передового хребта Большого Кавказа, рассмотрены подходы к решению одной из фундаментальных проблем в области геологии золоторудных месторождений – выявлению характера и причин платино- и палладиеносности золоторудных месторождений.

2. Выявленные повышенные содержания благородных металлов в низах вертикальных разрезов промышленных отходов, захороненных в ФХ, объясняются присутствием в нижнеюрских углеродсодержащих песчано-глинистых толщах, вмещающих Какадур-Ханикомское и Кадат-Хампаладагское месторождения, нового для Северного Кавказа ниже-среднеюрского золото-платиноидного с полиметаллами оруденения. Этот вывод, в отношении золота, серебра и полиметаллов, полностью подтвержден результатами поисковых работ проведенных в пределах Авсандур-Ламардонского рудного поля (Давыдов и др., 2009; Туаев, 2019).

3. Поисковыми работами, проведенными в 2019 г. АО «Северо-Кавказское ПГО» АО «Росгеология» в пределах Какадурского и Ламардонского участков [Туаев, 2019], были существенно уточнены границы ранее выявленных рудных зон (Давыдов и др., 2009) и их апофиз с актуализацией информации об их морфометрических параметрах. Установлено существенное уменьшение мощностей рудных зон в сравнении с полученными ранее данными (Давыдов и др., 2009). По уточненным границам, в пределах рудных зон и их фрагментов (рудная зона Какадур-Северный, Какадур-Южный, апофиза Центральная, Северная, Цатадонские жилы) горно-буровыми работами, в комплексе с геофизическими работами методом «Вызванной поляризации», дана оценка золотоносности выявленных объектов золоторудной минерализации с поверхности и на глубину до 300 м, а также оценена сплошность распространения золотого оруденения как на поверхности, так и на глубину до 300 м (Туаев, 2019). Доказано общее незначительное снижение с глубиной параметров оруденения как по мощности, так и по содержаниям рудных элементов.

4. Установлено, что «рудные тела» приурочены к участкам с наибольшей степенью гидротермально-метасоматической и тектонической проработки (наличие зон дробления, вплоть до глинки трения, зеркал скольжения) по аргиллитам и алевролитам, выраженной в объемном окварцевании, а местами с кварцевыми жилами мощностью 20-40 см, существенной лимонитизацией, развитием рассеянной, мелкогнездовой и прожилковой вкрапленности пирита, реже галенита, сфалерита и халькопирита.

Характерной структурной особенностью вскрытых разрезов обоих участков (Какадур, Ламардон) является непрерывная смена зон дробления на серии сближенных плоскостей скольжения, зоны рассланцевания, глинки трения и единичные плоскости скольжения.

5. Основные перспективы РСО-А на обнаружение промышленно-значимого золото-платиноидного с полиметаллами черносланцевого типа оруденения связаны с Фиагдон-Терской структурно-формационной подзоной, в которой выделен Дагом-Терский рудный район с тремя рудными полями – Дагом-Терским, Афсандур-Ламардонским и Дагом-Кадатским (Давыдов и др., 2009; Туаев, 2019), а также с полной утилизацией промышленных отходов Фиагдонского хвостохранилища, с предварительным селективным извлечением из них благородных и полиметаллов и экологически опасных элементов (Гурбанов и др., 2019б).

Литература

1. Ананьев Ю. С., Коробейников А. Ф. Метасоматизм и благороднометальное оруденение в черносланцевых толщах Западной Калбы. – Томск: Томский ГУ, 2009. – 206 с.
2. Асаналиев У. А., Кабаев О. Д., Турдукеев И. Д. Стратиформные месторождения докембрия и закономерности их формирования. // Геодинамика, металлогения полезных ископаемых и геоэкология. / Сб. научных трудов. – Бишкек. – 1999. – С. 100-121.
3. Баранников А. Г. Золотоносность Гогинского рудно-россыпного узла. – Екатеринбург: УГГУ, 2006. – 198 с.
4. Богуш И. А. Благородные металлы углеродсодержащей формации Передового хребта Северного Кавказа. // Новые идеи в науках о Земле. Тезисы докладов V международной конференции. Т. 2. – М.: МГТА, 2001. – С. 190-191.
5. Богуш И. А., Рябов Г. В., Кафтанатий А. Б. Минералы платиновой группы в аллювии бассейна рек Уруп – Большая Лаба (Северный Кавказ) // Доклады Академии наук. 2010. Т. 435, №3. С. 357-360.
6. Богуш И. А., Бурцев А. А., Черкашин В. И. Благородные металлы в черных сланцах Уруп-Лабинского района Северного Кавказа. // Современные проблемы геологии, геофизики и геоэкологии Северного Кавказа. Материалы V научно-технической конференции. Республика Северная Осетия – Алания, 22-25 октября 2015 г. – Владикавказ. – 2015. – С. 34-39.
7. Богуш И. А., Черкашин В. И., Рябов Г. В. и др. Новый тип оруденения благородных металлов на Северном Кавказе. // Доклады Академии наук. – 2016а. – Т. 466, №2. – С. 193-195.
8. Богуш И. А., Бурцев А. А., Рябов Г. В. и др. Благородные металлы черносланцевого комплекса Уруп-Лабинского района Северного Кавказа. // Грозненский Естественно-научный бюллетень. – 2016б. – №3 (3). – С. 25-32.
9. Богуш И. А., Бурцев А. А., Рябов Г. В. Минералы благородных металлов и их источники на Северном Кавказе. // Наука юга России. – 2017. – Т. 13, №2. – С. 34-40.
10. Буряк В. А. Метаморфогенное рудообразование. – М.: Недра, 1981. – 256 с.
11. Буряк В. А. Минерогения золота. – Владивосток: Дальнаука, 2003. – 262 с.
12. Буряк В. А., Горячев Н. А., Сидоров В. А. и др. Основные литостратиграфические уровни юго-востока Яно-Колымского золотоносного пояса, благоприятные для локализации оруденения. // Проблемы геологии и металлогении Северо-Востока Азии на рубеже тысячелетий / Билибинские чтения. Том 2. Металлогения. – Магадан: СВКНИИ ДВО РАН, 2001. – С. 143-145.
13. Буряк В. А., Гончаров В. И., Горячев Н. А. Эволюционный ряд крупнообъемных золото-платиноидных месторождений в углеродистых толщах. // Доклады Академии наук. – 2002а. – Т. 387, №4. – С. 512-515.
14. Буряк В. А., Михайлов Б. К., Цымбалюк Н. В. Генезис, закономерности размещения и перспективы золото- и платиноносности черносланцевых толщ. // Руды и металлы. – 2002б. – №6. – С. 25-36.
15. Буряк В. А., Гончаров В. И., Горячев Н. А. и др. О соотношении кварцевожильной золотой и вкрапленной золото-сульфидной минерализаций с платиноидами в черносланцевых толщах. // Доклады Академии наук. – 2005. – Т. 400, №1. – С. 56-59.
16. Великанов А. Я., Сазонов В. Н. РЗЭ и другие микроэлементы в геологических образованиях золоторудного месторождения Ашка // Вестник УрО РМО. 2010. №7. С. 14-19.
17. Гамянин Г. Н., Горячев Н. А. Изотопно-геохимические исследования золоторудно-магматических систем. // Магматизм и метаморфизм Северо-Востока Азии. Материалы IV регионального петрографического совещания по Северо-Востоку России. – Магадан. – 2000. – С. 136-140.
18. Гончаров В. И., Ворошин С. В., Сидоров В. А. и др. Платиноносность золоторудных месторождений в черносланцевых толщах Северо-Востока России: проблемы и перспективы. // Платина России. Проблемы развития минерально-сырьевой базы платиновых металлов в XXI веке. – М.: Геоинформмарк, 1995. – Т. 2. Кн. 2. – С. 156-161.

19. Гончаров В. И., Гамянин Г. Н., Сидоров В. А. и др. Элементы платиновой группы в золоторудных месторождениях мезозойских черносланцевых толщ Северо-Востока России. // Золото Сибири и Дальнего Востока: геология, геохимия, экономика, экология. – Улан-Удэ: Изд-во Бурятского научного центра СО РАН, 2004. – С. 53-55.
20. Гончаров В. И., Ворошин С. В., Сидоров В. А. Наталкинское золоторудное месторождение. – Магадан: СВКНИИ ДВО РАН, 2002. – 250 с.
21. Горячев Н. А. Происхождение золото-кварцевых жильных поясов Северной Пацифики. – Магадан: СВКНИИ ДВО РАН, 2003. – 143 с.
22. Горячев Н. А., Гамянин Г. Н. Изотопно-геохимические исследования золоторудно-магматических систем. // Магматизм и метаморфизм Северо-Востока Азии. – Магадан: СВКНИИ ДВО РАН, 2000. – С. 136-140.
23. Горячев Н. А., Соцкая О. Т., Михалицына Т. И. и др. Оценка Au-Pt-Pd-Ni в рудах типовых месторождений (Наталка, Дегдекан) в черносланцевых толщах Яно-Колымского золоторудного пояса. // Проблемы минерации России. – Магадан: СВКНИИ ДВО РАН, 2004.
24. Гурбанов А. Г., Лексин А. Б., Газеев В. М. и др. Вариации содержаний макро- и микроэлементов в вертикальных разрезах в промышленных отходах Фиагдонского хвостохранилища (Республика Северная Осетия-Алания). // Вестник ВНИЦ РАН. – 2019а. – Т. 19. № 1. – С. 59-68.
25. Гурбанов А. Г., Богатиков О. А., Лексин А. Б. и др. Первые данные о вариациях содержаний макро-, микроэлементов и благородных металлов в вертикальных разрезах в промышленных отходах Фиагдонского хвостохранилища (Республика Северная Осетия-Алания). // Доклады Академии наук. – 2019. – Т. 487. № 1. – С. 67-70.
26. Гурская Л. И. Платинометальное оруденение черносланцевого типа и критерии его прогнозирования. – СПб.: Изд-во ВСЕГЕИ, 2000. – 208 с.
27. Додин Д. А., Чернышов Н. М., Чередникова О. И. Металлогения платиноидов крупных регионов России. – М.: Геоинформмарк, 2001. – 302 с.
28. Додин Д. А., Золотов К. К., Коротеев В. А. и др. Углеродистые формации – новый крупный источник платиновых металлов XXI века. – М.: Геоинформмарк, 2007. – 130 с.
29. Жмодик С. М., Миронов А. Г., Жмодик А. С. Золото-концентрирующие системы офиолитовых поясов (на примере Саяно-Байкало-Муйского пояса). – Новосибирск: Гео, 2008. – 304 с.
30. Кабаев О. Д. Распределение и формирование благородных и редких металлов в докембрийских толщах Центральной зоны Северного Тянь-Шаня. // Известия Вузов. – 2005. – № 4. – С. 13-15.
31. Кабаев О. Д., Валяев В. П., Сатвинский В. А. Геологическое строение площади рудопроявления Кенсу-Карамако и предложения по проведению поисково-разведочных работ. // 8-я Международная конференция. Кыргызская горная ассоциация. – Бишкек. – 2003. – С. 25-29.
32. Калмурзаев К. С., Сартбаев М. К. и др. Металлоносные углеродистые отложения Кыргызстана. – Бишкек: Илим, 1992. – 195 с.
33. Ковалев С. Г. Рифтогенный магматизм и благороднометальное оруденение Западного склона Южного Урала. // Проблемы геологии рудных месторождений, минералогии, петрографии и геохимии. Мат конф. – М.: ИГЕМ РАН, 2008. – С. 85-87.
34. Константинов М. М., Некрасов В. А., Сидоров А. А. и др. Золоторудные гиганты России и мира. – М.: Научный мир, 2000. – 272 с.
35. Лаверов Н. П., Дистлер В. В. и др. Платина и другие самородные металлы в рудах месторождения золота Сухой Лог. // Доклады РАН. – 1997. – Т. 355. № 5. – С. 664-668.
36. Лазаренков В. Г., Смыслов А. А., Тихомиров Л. И. Платинометальные провинции России. // Крупные и уникальные месторождения редких и благородных металлов. – СПб.: Санкт-Петербургский горный институт, 1998. – С. 210-230.

37. Моисеенко В. Г., Степанов В. А., Эйриш Л. В., Мельников А. В. Платиноносность Дальнего Востока. – Владивосток: Дальнаука, 2004. – 176 с.
38. Новожилов Ю. М., Гаврилов А. М. Золото-сульфидные месторождения в углеродисто-терригенных толщах. – М.: Изд. ЦНИГРИ, 1999. – 175 с.
39. Парада С. Г. О платиноносности Северного Кавказа. // Проблемы геологии, планетологии, геоэкологии и рационального природопользования. Материалы VII международной научно-практической конференции (Новочеркасск, 1 декабря 2009 г.). – Новочеркасск: Центр оперативной полиграфии ЮРГТУ, 2009. – С. 10-13.
40. Платина России. Новые нетрадиционные типы платиносодержащих месторождений. // Результаты и направления работ по программе «Платина России». Сб. науч. трудов. Т. VI. – М.: Геоинформмарк, 2005. – 320 с.
41. Плюснина Л. П., Ханчук А. И., Гончаров В. И. и др. Золото, платина и палладий в рудах Наталкинского месторождения (Верхне-Колымский регион). // Доклады РАН. – 2003. – Т. 391. № 3. – С. 383-387.
42. Рудашевский Н. С., Кнауф В. В., Чернышов Н. М. Минералы платиновой группы из черных сланцев КМА. // Доклады РАН. – 1995. – Т. 334. № 1. – С. 91-95.
43. Сазонов В. Н., Огородников В. Н., Поленов Ю. А., Великанов А. Я. К проблеме «черносланцевого золота» на Урале. // Месторождения полезных ископаемых. Ежегодник-2010. Вып. 158. – Екатеринбург: Тр. ИГГ УрО РАН, 2010. – С. 179-181.
44. Сазонов В. Н., Коротеев В. А., Огородников В. Н. и др. Золото в «черных сланцах» Урала. // Литосфера. – 2011. – № 4. – С. 70-92.
45. Ханчук А. И., Плюснина И. П., Молчанов В. П. Первые данные о золото-платиноидном оруденении в углеродистых породах Ханкайского массива и прогноз крупного месторождения благородных металлов в Приморском крае. // Доклады РАН. – 2004. – Т. 397. № 4. – С. 524-529.
46. Холин В. М. Геология, геодинамика и металлогения раннепротерозойских структур КМА. // Автореф. дис. канд. геол.-минер. наук. – Воронеж. – 2001. – 24 с.
47. Чернышов Н. М. Формационно-генетическая типизация платинометального оруденения и перспективы наращивания минерально-сырьевого потенциала платиновых металлов России. // Вестник Воронежского ун-та. Сер. Геология. – 1996а. – Вып. 2. – С. 75-85.
48. Чернышов Н. М. Новый тип золото-платинометального оруденения в стратифицированных черносланцевых комплексах ВКМ (закономерности размещения, минералого-геохимические особенности и геолого-генетическая модель формирования). // Вестник Воронежского ун-та. Сер. Геология. – 1996б. – № 1. – С. 114-132.
49. Чернышов Н. М. Платиноносные формации Курско-Воронежского региона (Центральная Россия). – Воронеж: Изд-во Воронеж. гос. ун-та, 2004. – 448 с.
50. Чернышов Н. М. Благороднометаллосодержащие парагенезисы сульфидов и их аналогов в железорудных месторождениях КМА (Центральная Россия). // Вестник Воронежского государственного университета. Сер. Геология. – 2007. – Вып. 1. – С. 101-114.
51. Чернышов Н. М. Минералогия золото-платинометального оруденения железорудных месторождений-гигантов (Центральная Россия). // Доклады научной сессии геологического факультета Воронежского государственного университета, 4-29 апреля 2011 г. – Воронеж. – 2011. – Вып. 1. – С. 3-23.
52. Чернышов Н. М., Попкова Н. В. Золото-платиноносная рудовмещающая система стратиформного типа в докембрийских образованиях Михайловского рудного узла КМА. // Вестник Воронежского гос. ун-та. Сер. Геология. – 2006. – № 2. – С. 159-166.
53. Чернышов Н. М., Холин В. М., Стрик Ю. Н. Металлогения Алексеевско-Воронежской рифтогенной зоны КМА. // Рифтогенез, магматизм, металлогения докембрия. Корреляция геологических комплексов Феноскандии. Материалы Междунар. конф. – Петрозаводск. – 1999. – С. 53-54.
54. Чернышов Н. М., Альбеков А. Ю., Абрамов В. В. и др. Золото-платинометальное оруденение в черных сланцах, железных рудах и техногенных продуктах месторождений

гигантов КМА Центральной России (типы, состав, ресурсы и комплексное освоение). // Проблемы минерализации России. – 2011. – С. 59-66.

55. Carville D.P., Leckie J.F., Moorhead J.G. et al. Coronation Hill gold-platinum deposit. // *Geology of the Mineral Deposits of Australia and Papua New Guinea*. – 1990. – Vol. 1. – pp. 759-762.

56. Crauch R.I., Coveney R.M., Murawchick J.B. et al. Black shales as hostes for unconventional platinum-group-element resources. Example from Southern China end the Yukon, Canada, and implications for US resources. // *US Geol. Surv.* – 1991. – No. 1062. – pp. 33-34.

57. Large R., Maslennikov V., Robert F. et al. Multistage sedimentary and metamorphic origin of pyrite and gold in the giant Sukhoy Log deposits, Lena gold province, Russia. // *Econ. Geol.* – 2007. – Vol. 102. – pp. 1233-1267.

58. Hodge V.P., Stallard M., Koide M., Goldberg E. D. Platinum and palladium anomaly in the marine environment. // *Earth Planetary Science Letters*. – 1985. – Vol. 72. No. 2-3. – pp. 158-162.

59. Sparrow G.J., Woodcock J.T. Some mineralogical and metallurgical factors in the recovery of platinum-group elements from ores. // *Abstr. VIth International Platinum symposium*. – Perth, W. Australia. – 1991. – pp. 48-49.

60. Tarkian M., Koopman G. Platinum-group minerals in the Santo Tomas II (Philex) porphyry copper-gold deposit, Luzon Island, Phillipines. // *Mineral. Deposita*. – 1995. – Vol. 30. – pp. 39-47.

61. Werle J. L., Ikramuddin M., Mutshler F. E. Allaed stock, La Plata Mountains, Colorado – peralkaline rock-hosted porphyry copper-precious metal district. // *Canadian J. Earth. Sci.* – 1984. – Vol. 21. No. 6. – pp. 630-641.

References

1. Anan'ev Yu. S., Korobeinikov A. F. Metasomatism and noble metal mineralization in the black shale strata of Western Kalba. Tomsk, Tomsk State University, 2009. 206 p. (In Russ.)

2. Asanaliev U.A., Kabaev O.D., Turdukeev I.D. Precambrian stratiform deposits and patterns of their formation. Geodynamics, metallogeny of minerals and geoecology. In: *Proceedings of research papers*. Bishkek, 1999. pp. 100-121. (In Russ.)

3. Barannikov A. G. Gold content of the Goginsky ore-alluvial cluster. Yekaterinburg, UGGU, 2006. 198 p. (In Russ.)

4. Bogush I.A. Noble metals of the carbon-bearing formation of the Peredovoi Ridge of the North Caucasus. New Ideas in Earth Sciences. In: *Book of abstracts of the V international conference*. Vol. 2. Moscow. MGGA, 2001. pp. 190-191. (In Russ.)

5. Bogush I.A., Ryabov G. V., Kaftanatii A. B. Platinum group minerals in the alluvium of the Urup – Bolshaya Laba river basin (North Caucasus). *Reports of the Academy of Sciences*, 2010. Vol. 435. No. 3. pp. 357-360. (In Russ.)

6. Bogush I.A., Burtsev A.A., Cherkashin V.I. Noble metals in black shales of the Urup-Labinsk region of the North Caucasus. Modern problems of geology, geophysics and geoecology of the North Caucasus. In: *Proceedings of the V scientific and technical conference*. RNO-Alania, October 22-25, 2015, Vladikavkaz, 2015. pp. 34-39. (In Russ.)

7. Bogush I.A., Cherkashin V.I., Ryabov G. V. et al. A new type of mineralization of precious metals in the North Caucasus. *Reports of the Academy of Sciences*, 2016a. Vol. 466. No. 2. pp. 193-195. (In Russ.)

8. Bogush I.A., Burtsev A.A., Ryabov G. V. et al. Noble metals of the black shale complex of the Urup-Labinsk region of the North Caucasus. *Grozny Natural Science Bulletin*, 2016b. No. 3 (3). pp. 25-32. (In Russ.)

9. Bogush I.A., Burtsev A.A., Ryabov G. V. Minerals of noble metals and their sources in the North Caucasus. *Science of the Russian South*, 2017. Vol. 13. No. 2. pp. 34-40. (In Russ.)

10. Buryak V.A. Metamorphogenic ore formation. Moscow. Nedra, 1981. 256 p. (In Russ.)

11. Buryak V.A. Minerageny of gold. Vladivostok, Dal'nauka, 2003. 262 p. (In Russ.)
12. Buryak V.A., Goryachev N.A., Sidorov V.A. et al. The main lithostratigraphic levels of the southeast of the Yano-Kolyma gold-bearing belt, favorable for the localization of mineralization. In: Problems of geology and metallogeny of North-East Asia at the turn of the millennium. Vol. 2. Metallogeny. Magadan: SVKNII FEB RAS, 2001. pp. 143-145. (In Russ.)
13. Buryak V.A., Goncharov V.I., Goryachev N.A. Evolutionary series of large-volume gold-platinoid deposits in carbonaceous strata. Reports of the Academy of Sciences, 2002a. Vol. 387. No. 4. pp. 512-515. (In Russ.)
14. Buryak V.A., Mikhailov B.K., Tsymbalyuk N.V. Genesis, distribution patterns and prospects of gold and platinum-bearing black shale strata. Ores and metals, 2002b. No. 6. pp. 25-36. (In Russ.)
15. Buriak V.A., Goncharov V.I., Goryachev N.A. et al. About the ratio of quartz-veined gold and disseminated gold-sulfide mineralization with platinoids in black shale strata. Reports of the Academy of Sciences. 2005. Vol. 400. No. 1. pp. 56-59. (In Russ.)
16. Velikanov A. Ya., Sazonov V.N. REE and other trace elements in geological formations of the Ashka gold deposit. Bulletin of the UrO RMO. 2010. No. 7. pp. 14-19. (In Russ.)
17. Gamyanin G.N., Goryachev N.A. Isotope-geochemical studies of gold-ore-magmatic systems. Magmatism and metamorphism of Northeast Asia. In: Proceedings of the IV regional petrographic meeting on the North-East of Russia. Magadan. 2000. pp. 136-140. (In Russ.)
18. Goncharov V.I., Voroshin S.V., Sidorov V.A. et al. Platinum-bearing gold deposits in black shale strata of the North-East of Russia, problems and prospects. Platinum of Russia. Problems of the development of the mineral resource base of platinum metals in the XXI century. Moscow. Geoinformmark, 1995. Vol. 2. Book. 2. pp. 156-161. (In Russ.)
19. Goncharov V.I., Gamyanin G.N., Sidorov V.A. et al. Platinum group elements in gold deposits of Mesozoic black shale strata of the North-East of Russia. Gold of Siberia and the Far East, geology, geochemistry, economics, ecology. Ulan-Ude: Published by Buryat Scientific Center SB RAS, 2004. pp. 53-55. (In Russ.)
20. Goncharov V.I., Voroshin S.V., Sidorov V.A. Natalka gold ore deposit. Magadan, SVKNII FEB RAS, 2002. 250 p. (In Russ.)
21. Goryachev N.A. Origin of gold-quartz vein belts of the North Pacific. Magadan, NEISRI FEB RAS, 2003. 143 p. (In Russ.)
22. Goryachev N.A., Gamyanin G.N. Isotope-geochemical studies of gold-ore-magmatic systems. Magmatism and metamorphism of Northeast Asia. Magadan: NEISRI FEB RAS, 2000. pp. 136-140. (In Russ.)
23. Goryachev N.A., Sotskaya O.T., Mikhailsyna T.I. et al. Estimation of Au-Pt-Pd-Ni in ores of typical deposits (Natalka, Degdekan) in black shale strata of the Yano-Kolyma gold-ore belt. Problems of Minerageny in Russia. Magadan: NEISRI FEB RAS, 2004. (In Russ.)
24. Gurbanov A.G., Leksin A.B., Gazeev V.M. et al. Variations in the content of macro- and microelements in vertical sections in industrial waste of the Fiagdon tailing dump (Republic of North Ossetia-Alania). Bulletin of VSC RAS. 2019a. Vol. 19. No. 1. pp. 59-68. (In Russ.)
25. Gurbanov A.G., Bogatkov O.A., Leksin A.B. et al. The first data on variations in the content of macro-, microelements and precious metals in vertical sections in the industrial waste of the Fiagdon tailing dump (Republic of North Ossetia-Alania). Reports of the Academy of Sciences. 2019. Vol. 487. No. 1. pp. 67-70. (In Russ.)
26. Gurskaya L.I. Platinum-metal mineralization of the black shale type and criteria for its prediction. Saint Petersburg. Publishing house VSEGEI, 2000. 208 p. (In Russ.)
27. Dodin D.A., Chernyshov N.M., Cherednikova O.I. Metallogeny of platinoids in large regions of Russia. Moscow. Geoinformmark, 2001. 302 p. (In Russ.)
28. Dodin D.A., Zoloev K.K., Koroteev V.A. et al. Carbonaceous formations – a new major source of platinum metals in the XXI century. Moscow. Geoinformmark, 2007. 130 p. (In Russ.)

29. Zhmodik S. M., Mironov A. G., Zhmodik A. S. Gold-concentrating systems of ophiolite belts (on the example of the Sayan-Baikal-Muisky belt). – Novosibirsk: Geo, 2008. 304 p. (In Russ.)
30. Kabaev O. D. Distribution and formation of noble and rare metals in the Precambrian strata of the Central zone of the Northern Tien Shan. *Izvestiya Vuzov*. 2005. No. 4. pp. 13-15. (In Russ.)
31. Kabaev O. D., Valyaev V. P., Satvinsky V. A. Geological structure of the Kentsu-Karamako ore occurrence area and proposals for prospecting and exploration. In: *Proceedings of 8th International Conference. Kyrgyz Mining Association. Bishkek*. 2003. pp. 25-29. (In Russ.)
32. Kalmurzaev K. S., Sartbaev M. K. et al. Metalliferous carbonaceous deposits of Kyrgyzstan. Bishkek, Ilim, 1992. 195 p. (In Russ.)
33. Kovalev S. G. Riftogenic magmatism and precious metal mineralization of the Western slope of the Southern Urals. In: *Proceedings Problems of geology of ore deposits, mineralogy, petrography and geochemistry. Moscow. IGEM RAS*, 2008. pp. 85-87. (In Russ.)
34. Konstantinov M. M., Nekrasov V. A., Sidorov A. A. et al. Gold ore giants of Russia and the world. Moscow. Nauchnyi mir, 2000. 272 p. (In Russ.)
35. Laverov N. P., Distler V. V. et al. Platinum and other native metals in ores of the Sukhoi Log gold deposit. *DOKLADY AKADEMII NAUK*. 1997. Vol. 355. No. 5. pp. 664-668. (In Russ.)
36. Lazarenkov V. G., Smyslov A. A., Tikhomirov L. I. Platinum provinces of Russia. Large and unique deposits of rare and noble metals. Saint-Petersburg. Saint-Petersburg Mining Institute, 1998. pp. 210-230. (In Russ.)
37. Moiseenko V. G., Stepanov V. A., Eirish L. V., Mel'nikov A. V. Platinum content of the Far East. Vladivostok, Dalnauka, 2004. 176 p. (In Russ.)
38. Novozhilov Yu. M., Gavrilov A. M. Gold-sulfide deposits in carbonaceous-terrigenous strata. Moscow. Ed. TsNIGRI, 1999. 175 p. (In Russ.)
39. Parada S. G. About the platinum content of the North Caucasus. Problems of geology, planetology, geoecology and rational nature management. In: *Proceedings of the VII International Scientific and Practical Conference (Novocherkassk, December 1, 2009). Novocherkassk, Center for Operational Printing YRSTU*, 2009. pp. 10-13. (In Russ.)
40. Platinum of Russia. New unconventional types of platinum-bearing deposits. Results and directions of work under the Platinum of Russia program. *Proceedings of research papers. Vol. VI. Moscow. Geoinformmark*, 2005. 320 p. (In Russ.)
41. Plyusnina L. P., Khanchuk A. I., Goncharov V. I. et al. Gold, platinum and palladium in the ores of the Natalka deposit (Verkhne-Kolyma region). *DOKLADY AKADEMII NAUK*. 2003. Vol. 391. No. 3. pp. 383-387. (In Russ.)
42. Rudashevskii N. S., Knauf V. V., Chernyshov N. M. Platinum group minerals from KMA black shales. *DOKLADY AKADEMII NAUK*. 1995. Vol. 334. No. 1. pp. 91-95. (In Russ.)
43. Sazonov V. N., Ogorodnikov V. N., Polenov Yu. A., Velikanov A. Ya. On the problem of "black shale gold" in the Urals. Mineral deposits. Yearbook 2010. Issue 158. Yekaterinburg, Proceedings of IGG UB RAS, 2010. pp. 179-181. (In Russ.)
44. Sazonov V. N., Koroteev V. A., Ogorodnikov V. N. et al. Gold in the "black shale" of the Urals. *Litosfera*. 2011. No. 4. pp. 70-92. (In Russ.)
45. Khanchuk A. I., Plyusnina I. P., Molchanov V. P. The first data on gold-platinoid mineralization in carbonaceous rocks of the Khanka massif and the forecast of a large deposit of precious metals in the Primorsky Territory. *DOKLADY AKADEMII NAUK*. 2004. Vol. 397. No. 4. pp. 524-529. (In Russ.)
46. Kholin V. M. Geology, geodynamics and metallogeny of the Early Proterozoic structures of the KMA. Abstract of a thesis, geological sciences. Voronezh. 2001. 24 p. (In Russ.)
47. Chernyshov N. M. Formation-genetic typification of platinum ore mineralization and the prospects for increasing the mineral resource potential of platinum metals in Russia. *Bulletin of Voronezh University. Ser. Geology*. 1996a. Issue 2. pp. 75-85. (In Russ.)

48. Chernyshov N.M. A new type of gold-platinum-metal mineralization in stratified black shale complexes of the VKM (distribution patterns, mineralogical and geochemical features and geological and genetic model of formation). *Bulletin of Voronezh University. Ser. Geology.* 1996b. No. 1. pp. 114-132. (In Russ.)
49. Chernyshov N.M. Platinum-bearing formations of the Kursk-Voronezh region (Central Russia). Voronezh. Publishing House of Voronezh State University, 2004. 448 p. (In Russ.)
50. Chernyshov N.M. Noble metal-bearing parageneses of sulfides and their analogues in the iron ore deposits of the KMA (Central Russia). *Bulletin of the Voronezh State University. Ser. Geology.* 2007. Issue. 1. pp. 101-114. (In Russ.)
51. Chernyshov N.M. Mineralogy of gold-platinum mineralization of giant iron ore deposits (Central Russia). In: Reports of the scientific session of the Geological Faculty of Voronezh State University, April 4-29, 2011 Voronezh. 2011. Issue 1. pp. 3-23. (In Russ.)
52. Chernyshov N.M., Popkova N.V. Gold-platinum-bearing ore-bearing system of the stratiform type in the Precambrian formations of the Mikhailovsky ore cluster of the KMA. *Bulletin of the Voronezh State University. Ser. Geology.* 2006. No. 2. pp. 159-166. (In Russ.)
53. Chernyshov N.M., Kholin V.M., Strik Yu.N. Metallogeny of the Alekseevsko-Voronetskaya riftogenic zone of the KMA. Riftogenesis, magmatism, Precambrian metallogeny. Correlation of geological complexes of Fenoscandia. In: Proceedings of the Intern. conf. Petrozavodsk. 1999. pp. 53-54. (In Russ.)
54. Chernyshov N.M., Al'bekov A. Yu., Abramov V.V. et al. Gold-platinum mineralization in black shale, iron ores and technogenic products of giant deposits of the KMA in Central Russia (types, composition, resources and integrated development). In: Problems of Minerageny in Russia. 2011. pp. 59-66. (In Russ.)
55. Carville D.P., Leckie J.F., Moorhead J.G. et al. Coronation Hill gold-platinum deposit. *Geology of the Mineral Deposits of Australia and Papua New Guinea.* 1990. Vol. 1. pp. 759-762.
56. Crauch R.I., Coveney R.M., Murawchick J.B. et al. Black shales as hostes for unconventional platinum-group-element resources. Example from Southern China and the Yukon, Canada, and implications for US resources. *US Geol. Surv.* 1991. No. 1062. pp. 33-34.
57. Large R., Maslennikov V., Robert F. et al. Multistage sedimentary and metamorphic origin of pyrite and gold in the giant Sukhoy Log deposits, Lena gold province, Russia. *Econ. Geol.* 2007. Vol. 102. pp. 1233-1267.
58. Hodge V.P., Stallard M., Koide M., Goldberg E.D. Platinum and palladium anomaly in the marine environment. *Earth Planetary Science Letters.* 1985. Vol. 72. No. 2-3. pp. 158-162.
59. Sparrow G.J., Woodcock J.T. Some mineralogical and metallurgical factors in the recovery of platinum-group elements from ores. *Abstr. VIth International Platinum symposium.* Perth, W. Australia. 1991. pp. 48-49.
60. Tarkian M., Koopman G. Platinum-group minerals in the Santo Tomas II (Philex) porphyry copper-gold deposit, Luzon Island, Phillipines. *Mineral. Deposita.* 1995. Vol. 30. pp. 39-47.
61. Werle J.L., Ikramuddin M., Mutshler F.E. Alladed stock, La Plata Mountains, Colorado – peralkaline rock-hosted porphyry copper-precious metal district. *Canadian J. Earth. Sci.* 1984. Vol. 21. No. 6. pp. 630-641.

ОБЩАЯ И РЕГИОНАЛЬНАЯ ГЕОЛОГИЯ

УДК 550.8:528.92 (075.8)

DOI: [10.46698/VNC.2020.55.16.002](https://doi.org/10.46698/VNC.2020.55.16.002)

Оригинальная статья

Новейшая структура и геодинамика Западного
Предкавказья (на основе дешифрирования
КОСМОСНИМКОВ)Г. С. Январёв 

Южно-Российский государственный политехнический университет (НПИ) им.
М. И. Платова, Россия, 346428, Ростовская обл., г. Новочеркасск, ул. Просвещения, 132,
e-mail: egor_yan@list.ru

Статья поступила: 29.08.2020, доработана: 19.10.2020, одобрена в печать: 21.11.2020

Резюме: Актуальность работы. Геодинамический анализ является важнейшим компонентом региональных геологических исследований. Использование дистанционных методов при геологическом картировании закрытых территорий существенно повышает информативность геологической карты и эффективность прогнозно-поисковых работ. **Цель работы.** В работе рассматривается взаимосвязь рельефа с неотектоническими движениями. Обращается внимание на основные морфологические элементы территории на разных уровнях генерализации цифровой модели рельефа. **Методы исследования.** Произведено дешифрирование цифровой модели рельефа, выделены линеаменты различных порядков (зоны селективной эрозии) как реакция экзогенных процессов на новейшие тектонические деформации. Дана геодинамическая интерпретация выявленных структур. Проведены палеогеографические реконструкции положения русел основных рек в плиоцен-голоценовый период. **Результаты исследования.** Установлено правосдвиговое смещение мозаики тектонических блоков на разных уровнях генерализации, нашедшее отражение в современных деформациях рельефа. Об этом свидетельствуют геометрические характеристики дешифрируемых элементов, кулисообразное расположение периодических серий линеаментов, косое расположение линеаментов относительно линии главного разлома, ориентированных в соответствии с эллипсом деформации, наложение структур друг на друга. Сдвиг по разлому в доплиоценовом фундаменте находит свое отражение в сложном поле напряжений перекрывающего чехла. Деформации соответствуют сколам Риделя, что подтверждается экспериментами, выполненными другими исследователями. Активизация тектонических движений привела к образованию тектонических клиньев, создавших естественные дамбы на пути движения водных потоков, что привело к существенной перестройке геоморфологии и палеогеографии территории. Выявлена миграция русел основных рек в западном направлении в плейстоцен-голоценовый период, их врезание в подстилающие отложения с образованием висячих долин.

Ключевые слова: цифровая модель рельефа, дешифрирование, линеаменты, правый сдвиг, сколы Риделя.

Для цитирования: Январёв Г. С. Новейшая структура и геодинамика Западного Предкавказья (на основе дешифрирования космоснимков). *Геология и геофизика Юга России*. 2020. 10 (4): 30 – 40. DOI: 10.46698/VNC.2020.55.16.002.

DOI: [10.46698/VNC.2020.55.16.002](https://doi.org/10.46698/VNC.2020.55.16.002)

Original paper

Latest structure and geodynamics of Western Caucasus (based on decoding of satellite images)

G. S. Yanvarev 

Platov South-Russian State Polytechnic University (NPI), 132 Prosveshcheniya Str.,
Novocherkassk 346428, Russian Federation, e-mail: egor_yan@list.ru

Received: 29.08.2020, revised: 19.10.2020, accepted: 21.11.2020

Abstract: Relevance. Geodynamic analysis is an essential component of regional geological research. The use of remote methods for geological mapping of closed territories significantly increases the information content of the geological map and the effectiveness of forecast and search operations. **Aim.** The paper considers the relationship of terrain with neotectonic movements. Attention is drawn to the main morphological elements of the territory at different levels of generalization of the digital terrain model. **Method of research.** The digital terrain model was deciphered and lineaments of various orders (zones of selective erosion) were identified) as a reaction of exogenous processes to the latest tectonic deformations. Geodynamic interpretation of the identified structures is given. Paleogeographic reconstructions of the position of the main riverbeds in the Pliocene-Holocene period were carried out. **Results.** The right-hand shift of the tectonic block mosaic at different levels of generalization is found, which is reflected in modern relief deformations. This is evidenced by the geometric characteristics of the elements to be decoded, the rocker-like arrangement of periodic series of lineaments, the oblique arrangement of lineaments relative to the main fault line, oriented in accordance with the deformation ellipse, and the superposition of structures on each other. The fault shift in the pre-Pliocene basement is reflected in the complex stress field of the overlapping cover. The deformations correspond to Riedel chips, which is confirmed by experiments performed by other researchers. The activation of tectonic movements led to the formation of tectonic wedges that created natural dams in the path of water flows, which led to a significant restructuring of the geomorphology and paleogeography of the territory. The migration of the main riverbeds in the Western direction during the Pleistocene-Holocene period, their embedding in the underlying sediments with the formation of hanging valleys, was revealed.

Keywords: digital terrain model, decoding, lineaments, right shift, Riedel chips.

For citation: Yanvarev G. S. Latest structure and geodynamics of Western Caucasus (based on decoding of satellite images). *Geologiya i Geofizika Yuga Rossii = Geology and Geophysics of Russian South*. (in Russ.). 2020. 10 (4): ... – DOI: 10.46698/VNC.2020.55.16.002.

Введение

Формирование новейшей структуры Скифской плиты, происходило в связи с перемещением на север Аравийской плиты на рубеже миоцена – плиоцена [Большой Кавказ..., 2007]. Соответственно новейшая структура этого региона формировалась при существенном участии горизонтальных напряжений. Территория Большого Кавказа подвержена разного уровня амплитудным перемещениям латерального и вертикального характера, без ясного представления общей структуры, как единого геологического сооружения, трудно познать до конца его современную структурнотектоническую архитектуру [Gorbatikov et al., 2015; Rogozhin et al., 2015;

Zaalishvili et al., 2015; Заалишвили, Чотчаев, 2016; Чотчаев и др., 2016; Shempelev et al., 2017; Заалишвили, Чотчаев, Шемпелев, 2018; Гиоргобиани, 2019].

Район исследования относится к Западному Предкавказью. В тектоническом отношении территория исследований входит в состав Скифской эпигерцинской плиты, в которой выделяется Азово-Кубанская впадина и западная часть Ставропольского свода.

Верхняя часть разреза до глубины 200 м от поверхности сложена аллювиальными галечниками плиоцен-плейстоценовых отложений, перекрытых на водоразделах четвертичными лессовидными суглинками.

Цель работы

Важнейшим компонентом региональных геологических исследований является геодинамический анализ, опирающийся как на теоретический фундамент, так и на фактический материал, получаемый в результате дистанционного зондирования Земли. В работе рассматривается взаимосвязь рельефа с неотектоническими движениями. Использование дистанционных методов при геологическом картировании закрытых территорий существенно повышает информативность геологической карты и эффективность прогнозно-поисковых работ.

Методы исследования

Основной реакцией экзогенных процессов на новейшие деформации в рельефе является селективная эрозия так называемых слабых зон [Корчуганова и др., 2001]. При этом образуются закономерно расположенные линейные понижения в рельефе [Nesje et al., 1992; Serrat, 2003; Miqueloni, Bueno, 2011; Kirchner, 2016; Raczkowska et al., 2018]. Анализ современной тектонической структуры Западного Предкавказья производился в два этапа. На первом этапе выполнялось дешифрирование цифровой модели рельефа (ЦМР) с выделением сети линеаментов, на втором – сопоставление результатов с экспериментальными данными. В дополнение проведены палеогеографические реконструкции положения русел основных рек в плиоцен-голоценовый период [Talling, Sowter, 1998; Berendsen, Stouthamer, 2002; Davidson, Hartley, 2010; Durkin et al., 2017; Gugliotta et al., 2015; Horner et al., 2019].

Результаты работы

Схема дешифрирования территории Западного Предкавказья приведена на рис. 1. На схеме обозначены эрозионные уступы бортов долин рек Псекупс (1), Пшиш (2), Белая (3), Лаба (4), Кубань (5), Егорлык (6) и их основных притоков. А также две генеральных системы линеаментов северо-западного (А) и субширотного (Б) простирания.

Все речные долины имеют характерный Z-образный изгиб с возрастанием амплитуды изгиба в направлении с юго-запада на северо-восток. Подобные изгибы прослеживаются в водотоках разных порядков. Основная водная артерия региона – Кубань – «упирается» в Тимашевскую ступень Скифской эпигерцинской плиты и резко меняет направление течения на 90°.

Южная система линеаментов подчеркивается коленообразным смещением малых водотоков, прямолинейностью русел, ориентированных в направлении не максимального уклона основания. Северная система линеаментов подчеркивается прямолинейными очертаниями русел малых рек, прямолинейным «продолжением» притоков в противоположных бортах основных русел.

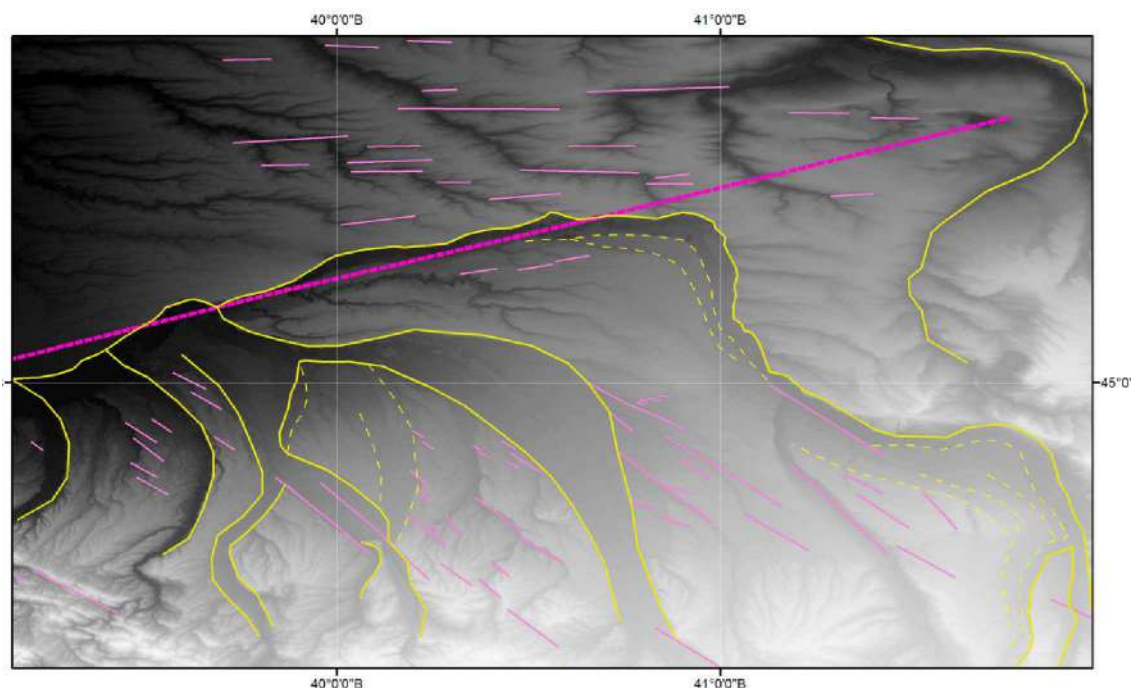


Рис. 1. Схема дешифрирования ЦМР (пояснения в тексте).

На схеме обозначены эрозионные уступы бортов долин рек Псекупс (1), Пшиш (2), Белая (3), Лаба (4), Кубань (5), Егорлык (6) и их основных притоков. А также две генеральные системы линеаментов северо-западного (А) и субширотного (Б) простирания. /

Fig. 1. DEM decoding scheme (explanations in the text). The diagram shows the erosional ledges of the sides of the valleys of the Psekups (1), Pshish (2), Belaya (3), Laba (4), Kuban (5), Egorlyk (6) rivers and their main tributaries. And also two general systems of lineaments of northwestern (A) and sublatitudinal (B) strike

Анализ схемы дешифрирования цифровой модели рельефа Западного Предкавказья позволяет предположить наличие двух крупных тектонических блоков в доплиоценовом фундаменте, смещающихся относительно друг друга по системе правого сдвига. Южный блок смещается в северо-западном направлении с поддвигом под северный.

Об этом свидетельствуют геометрические характеристики дешифрируемых элементов, кулисообразное расположение периодических серий линеаментов, косое расположение линеаментов относительно линии главного разлома, ориентированных в соответствии с эллипсом деформации, наложение структур друг на друга [Ramsay, 1980; Sylvester, 1988].

В соответствии с «моделью Риделя» (Riedel, 1929), сдвиг по разлому в доплиоценовом фундаменте находит свое отражение в сложном поле напряжений перекрывающего чехла, что находит подтверждение в экспериментах исследователей [Черемных, 2014; Фролова и др., 2016]. Экзогенные процессы вносят существенные изменения в рельеф, но главные закономерности, выявленные в экспериментах, сохраняются – южные линеаменты ориентированы в соответствии с антитетическими (сопряженными) сколами Риделя (R'), северные – ориентированы в соответствии с синтетическими сколами (R).

Выявленная система сколов достаточно отчетливо проявляется на разных уровнях генерализации ЦМР. Так, если схема, представленная на рисунке 1 соответ-

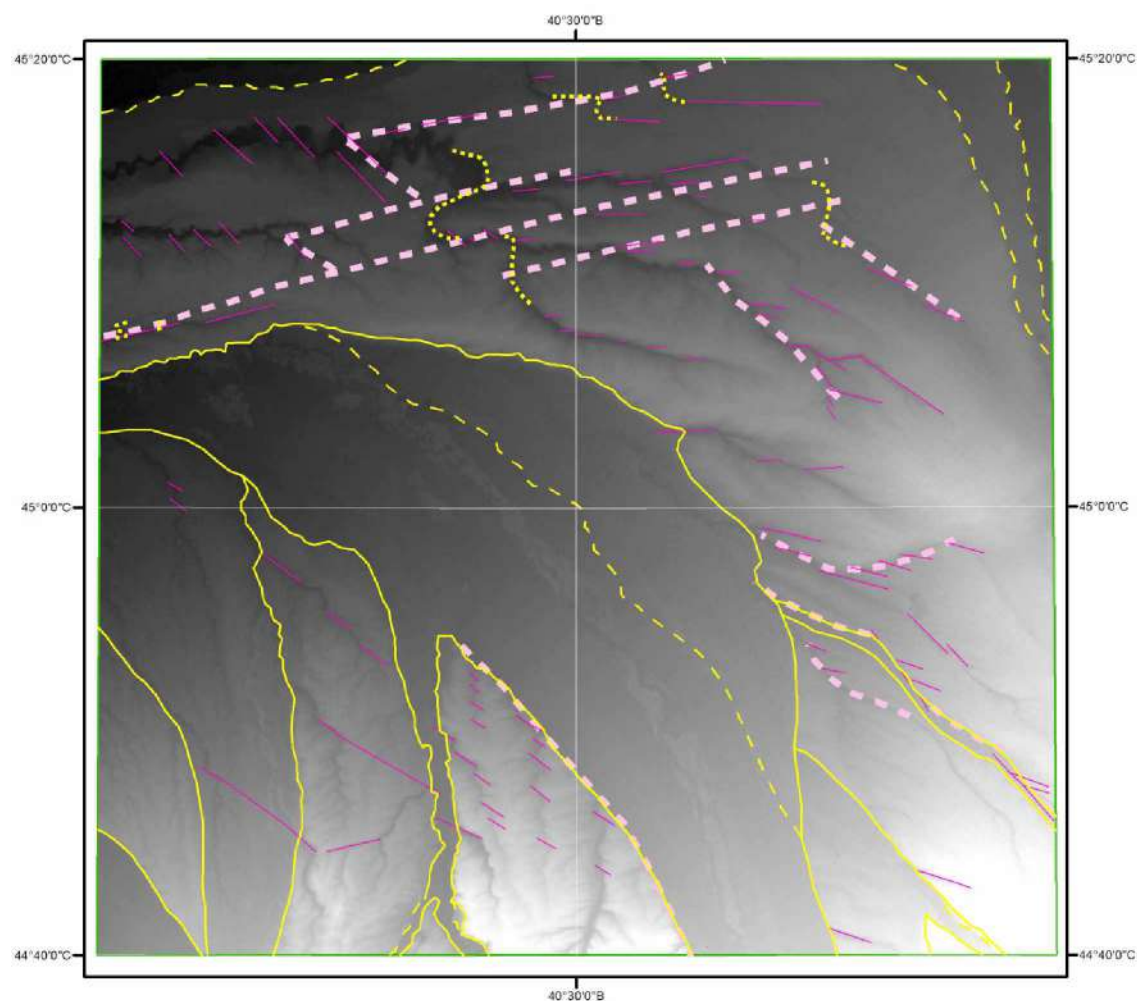


Рис. 2. Схема дешифрирования ЦМР листа L-37-XXIX.

Условные обозначения: 3 – р. Белая; 4 – р. Лаба; 5 – р. Кубань; а – эрозионные уступы; б – дешифрируемые лениаменты; в – Z-образный рисунок русел; г – интерпретация. Стрелки – поля напряжений и направления смещений. /

Fig. 2. Scheme for decoding DEM sheet L-37-XXIX. Legend: 3 – r. Belaya; 4 – r. Laba; 5 – r. Kuban; a – erosional ledges; b – identified lediments; c – Z-shaped pattern of channels; d – interpretation. Arrows – stress fields and displacement directions.

ствуется масштабу 1:100000, то на рисунке 2 представлена схема дешифрирования масштаба 1:200000 (лист L-37-XXIX). Поля напряжений реализуются в виде анти-тетических клиньев и поддвигов.

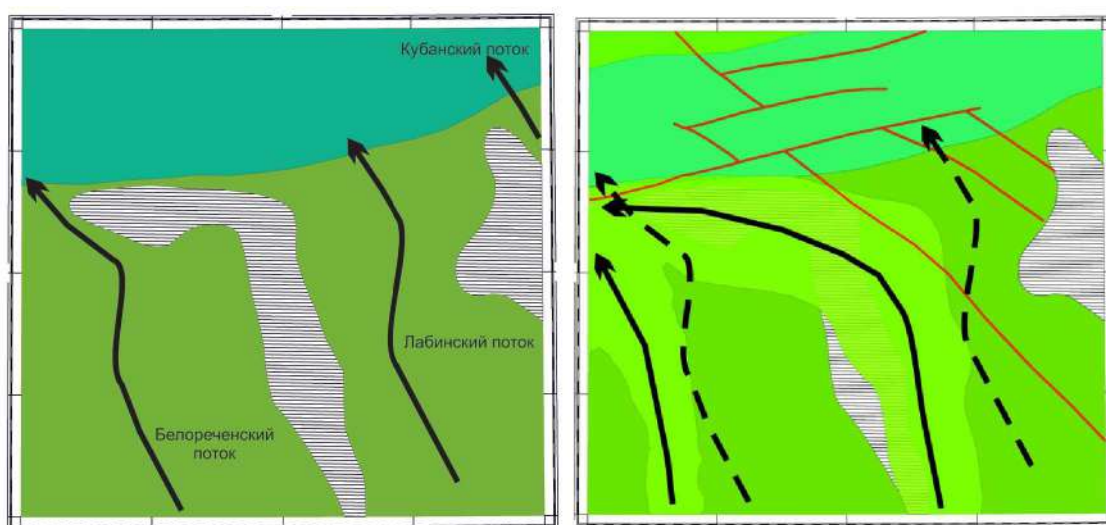
Обращает на себя внимание тот факт, что дешифрируемые элементы проявлены только в междуречьях рек и «стерты» очертаниями современных речных долин.

В процессе работ по геологическому доизучению площади листа L-37-XXIX, в которых автор принимал непосредственное участие, на основе анализа многочисленных разрезов, построенных по ранее пробуренным гидрогеологическим и картировочным скважинам, удалось выявить палеодолины основных водных потоков различного возраста (рис. 3).

На рисунке 3 (а) представлена схема размещения водных потоков эоплейстоценового возраста (aN_2-E_1). Палеодолины сложены гравийно-галечниковыми отложениями новокубанской и белореченской свит. При выходе водных потоков из

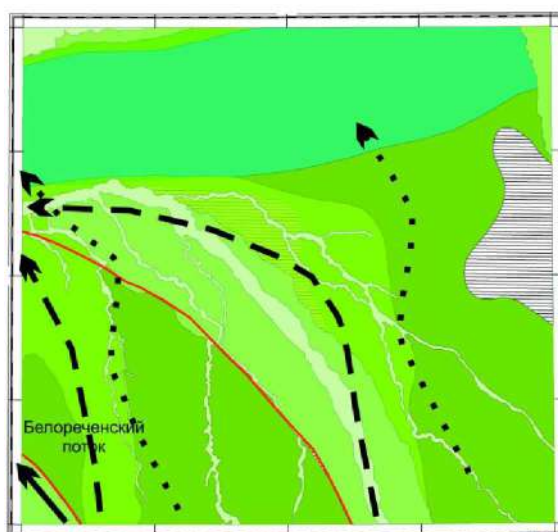
горного сооружения Кавказа на равнины, реки сливались и формировали широкий пояс аллювиальных и аллювиально-дельтовых наносов. При этом не существовало устойчивых русел водных потоков, что обусловило образование зоны так называемых «внутренних дельт», где русла ветвились на серию рукавов, протоков и озер, впадая в мелководный бассейн, сложенный отложениями центральнокубанской свиты. Дельты разделены участками суши, на которых накапливались красноцветные песчано-глинистые толщи.

На рисунке 3 (б) представлена схема размещения водных потоков среднеплейстоценового возраста (aII) на нижележащих отложениях. Схема иллюстрирует



а) схема размещения водных потоков эоплейстоценового возраста (aN₂-E₁) /
a) layout of water streams of the Eopleistocene age (aN₂-E₁)

б) схема размещения водных потоков среднеплейстоценового возраста (aII) /
b) the layout of water streams of the Middle Pleistocene age (aII)



в) схема размещения водных потоков верхнеплейстоценового и голоценового возраста (aIII, H) /

Рис. 3. Палеогеографические схемы листа L-37-XXIX. /

c) the layout of water streams of the Upper Pleistocene and Holocene age (aIII, H)

Fig. 3. Paleogeographic schemes of sheet L-37-XXIX, explanations in the text.

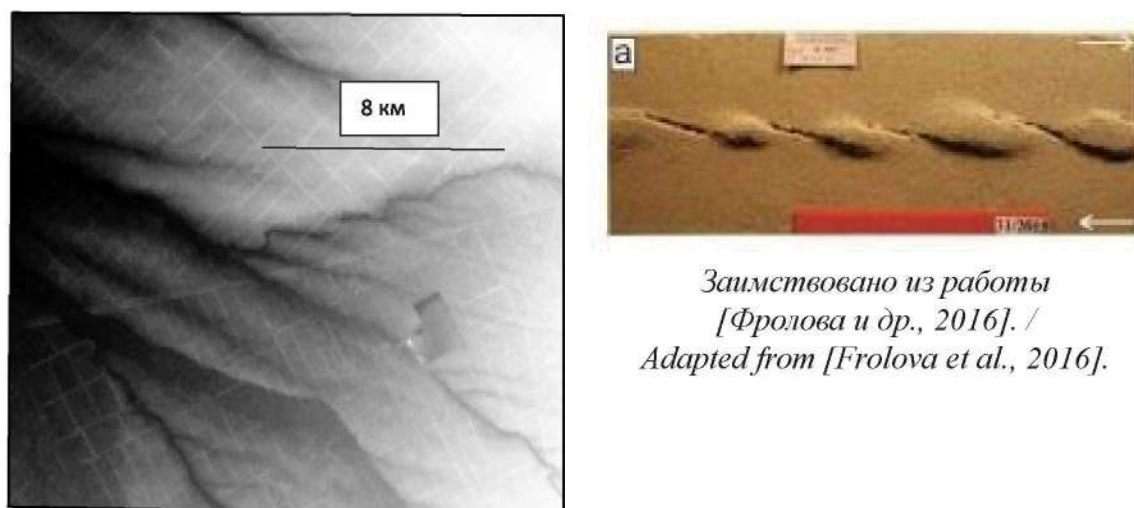


Рис. 4. Сопоставление природных и экспериментальных структур (пояснения в тексте). /

Comparison of natural and experimental structures (explanations in the text).

существенное сокращение площади водных потоков, их смещение в западном направлении и резкий поворот русла р. Лаба на запад. Среднечетвертичные отложения врезаются в более древние образования. Смещение и поворот потоков на запад, вероятно, связаны с активизацией тектонических движений, которые привели к образованию тектонических клиньев, создавших естественные «дамбы» на пути движения водных потоков.

На рисунке 3 (в) представлена схема размещения водных потоков верхнеплейстоценового и голоценового возраста (аIII, Н) на нижележащих отложениях. Схема иллюстрирует дальнейшее сокращение ширины речных долин, уменьшение мощности водных потоков и разделение их на несколько рек в современное время. Видно, что русло Лабы продолжило свое смещение к западу. Река Белая, кроме смещения к западу, изменила направление и значительно врезалась в подстилающие отложения, образуя висячую долину старого русла.

Отмеченные перестройка геоморфологии и палеогеографии территории подтверждают смещение южного тектонического блока по отношению к северному в западном направлении и связаны с активизацией двух крупных разрывных нарушений северо-западного простирания, отделивших Адыгейский выступ от Восточно-Кубанского прогиба.

На рисунке 4 (слева) представлена ЦМР фрагмента исследуемой территории масштаба 1:50000. В центральной части снимка отчетливо проявлена периодическая серия параллельных балок, разделенных валами поднятий.

Морфологический рисунок полностью соответствует результатам опыта по отражению сдвига во влажном песке (справа) [Фролова и др., 2016]. Балки наследуют местоположение трещин отрыва, формирующихся в результате развития сдвига, разделяющие их поднятия – результат увеличения объема слабо литифицированных конгломератов вследствие переупаковки обломочного материала.

Выводы

Анализ дешифрирования цифровой модели рельефа Западного Предкавказья на разных уровнях генерализации и палеогеографические реконструкции позволяют предложить следующую геокинематическую интерпретацию: тектонический блок Восточно-Кубанского прогиба в доплиоценовом фундаменте смещается в северо-западном направлении с поддвигом под Тимашевскую ступень Скифской плиты, формируя мозаику микроблоков. Возникающие поля напряжений реализуются в современном чехле в виде сколов Риделя. «Слабые» зоны отражаются системой современных водотоков на разных уровнях генерализации. Смещение тектонических блоков привело к существенной перестройке геоморфологии и палеогеографии территории.

Литература

1. Большой Кавказ в альпийскую эпоху. / Под. ред. Ю. Г. Леонова. – М.: ГЕОС, 2007. – 368 с.
2. Гиоргобиани Т. В. Условия формирования альпийской складчатой системы Большого Кавказа и характерные особенности ее структуры. // Геология и геофизика Юга России. – 2019. – Т. 9. № 1. – С. 43-57. DOI: 10.23671/VNC.2019.1.26787.
3. Заалишвили В. Б., Чотчаев Х. О. Комплексный анализ геологических данных и скоростной модели ММЗ на разрезах Центрального Кавказа. // Геология и геофизика Юга России. – 2016. – № 4. – С. 52-67.
4. Заалишвили В. Б., Чотчаев Х. О., Шемпелев А. Г. Признаки геодинамической обстановки и элементов структурно-вещественных комплексов Центрального Кавказа на глубинном разрезе Геналдонского профиля. // Геология и геофизика Юга России. – 2018. – № 4. – С. 58-74.
5. Корчуганова Н. И., Костенко Н. П., Межеловский И. Н. Неотектонические методы поисков полезных ископаемых. – М. – 2001-212 с. (МПР РФ, Геокарт, МГТА).
6. Развитие деформаций в зонах сдвига: результаты физического моделирования с использованием песка. / Н. С. Фролова, А. Н. Корбутяк, А. А. Мишакина, С. В. Корпач. // Материалы докладов всероссийской конференции с международным участием. Четвертая тектонофизическая конференция в ИФЗ РАН Тектонофизика и актуальные вопросы наук о Земле. Т. 2. – М.: ИФЗ РАН, 2016. – С. 385-392.
7. Черемных А. С. Сдвиговая разломная зона в рельефе: анализ цифровых моделей экспериментальных и природных объектов. // Вестник ИргТУ. – 2014. – № 2 (85). – С. 92-103.
8. Чотчаев Х. О., Заалишвили В. Б., Невский Л. Н., Шемпелев А. Г. Геоморфология как признак наследственности структурных особенностей Земной коры. // Геология и геофизика Юга России. – 2016. – № 1. – С. 141-158.
9. Berendsen H. J. A., & Stouthamer E. Paleogeographic evolution and avulsion history of the Holocene Rhine-Meuse delta, The Netherlands [Article; Proceedings Paper]. // *Geologie En Mijnbouw-Netherlands Journal of Geosciences*. – 2002. – Vol. 81 (1). – pp. 97-112.
10. Davidson S. K., & Hartley A. J. Towards a quantitative method for estimating paleohydrology from clast size and comparison with modern rivers [Article]. // *Journal of Sedimentary Research*. – 2010. – Vol. 80 (7-8). – pp. 688-702. <https://doi.org/10.2110/jsr.2010.062>
11. Durkin P. R., Boyd R. L., Hubbard S. M., Shultz A. W., & Blum M. D. Three-dimensional reconstruction of meander-belt evolution, cretaceous McMurray formation, Alberta foreland basin, Canada [Article]. // *Journal of Sedimentary Research*. – 2017. – Vol. 87 (10). – pp. 1075-1099. <https://doi.org/10.2110/jsr.2017.59>
12. Gorbatikov A. V., Rogozhin E. A., Stepanova M. Y., Kharazova Y. V., Andreeva N. V., Perederin F. V., Zaalishvili V. B., Mel'kov D. A., Dzeranov B. V., Dzeboev B. A., &

Gabaraev A. F. The pattern of deep structure and recent tectonics of the Greater Caucasus in the Ossetian sector from the complex geophysical data. // *Izvestiya-Physics of the Solid Earth*. – 2015. – Vol. 51 (1). – pp. 26-37. <https://doi.org/10.1134/s1069351315010073>

13. Gugliotta M., Flint S. S., Hodgson D. M., & Veiga G. D. Stratigraphic record of river-dominated crevasse subdeltas with tidal influence (Lajas formation, Argentina) [Article]. // *Journal of Sedimentary Research*. – 2015. – Vol. 85 (3). – pp. 265-284. <https://doi.org/10.2110/jsr.2015.19>

14. Horner S. C., Hubbard S. M., Martin H. K., & Hagstrom C. A. Reconstructing basin-scale drainage dynamics with regional subsurface mapping and channel-bar scaling, Aptian, Western Canada Foreland Basin [Article]. // *Sedimentary Geology*. – 2019. – Vol. 385. – pp. 26-44. <https://doi.org/10.1016/j.sedgeo.2019.03.012>

15. Kirchner K. The Dyje Canyon-like Valley: Geomorphological Landscape of Deep Valley at the Eastern Part of the Marginal Slope of Bohemian Massif. In T. Panek & J. Hradecky (Eds.). // *Landscapes and Landforms of the Czech Republic*. – 2016. – pp. 233-247. https://doi.org/10.1007/978-3-319-27537-6_19

16. Miqueloni D. P., & Bueno C. R. P. (Multivariate analysis and spatial variability to estimate soil erodibility of an anfiisol. // *Revista Brasileira De Ciencia Do Solo*. – 2011. – Vol. 35 (6). – pp. 2175-2182. <https://doi.org/10.1590/s0100-06832011000600032>

17. Nesje A., Dahl S. O., Valen V., & Ovstedal J. Quaternary erosion in the Sognefjord drainage-basin, Western Norway. // *Geomorphology*. – 1992. – No. 5 (6). – pp. 511-520. [https://doi.org/10.1016/0169-555x\(92\)90022-g](https://doi.org/10.1016/0169-555x(92)90022-g)

18. Raczowska Z., Bucala-Hrabia A., & Prokop P. Geomorphological and sedimentological indicators of land degradation (Meghalaya Plateau, NE India). // *Land Degradation & Development*. – 2018. – Vol. 29 (8). – pp. 2746-2759. <https://doi.org/10.1002/ldr.3020>

19. Ramsay J. G. Shear zone geometry: a review. // *J. of Struct. Geol.* – 1980. – Vol. 2. No. 1-2. – pp. 83-99.

20. Rogozhin E. A., Gorbatiyov A. V., Zaalishvili V. B., Stepanova M. Y., Andreeva N. V., & Kharazova Y. V. New data on the deep structure, tectonics, and geodynamics of the Greater Caucasus. *Doklady Earth Sciences*. – 2015. – Vol. 462 (1). – pp. 543-545. <https://doi.org/10.1134/s1028334x15050244>

21. Serrat P. The Aglyriver: long-term evolution and present fluvial dynamics of a coastal stream. // *Houille Blanche-Revue Internationale De L Eau*. – 2003. – No. 5. – pp. 137-146. <https://doi.org/10.1051/lhb/2003104>

22. Shempelev A. G., Zaalishvili V. B., & Kukhmazov S. U. Deep structure of the western part of the Central Caucasus from geophysical data. // *Geotectonics*. – 2017. – Vol. 51 (5). – pp. 479-488. <https://doi.org/10.1134/s0016852117050053>

23. Sylvester A. G. Strike-slip faults. // *Geol. Soc. of Amer. Bull.* – 1988. – Vol. 100. No. 11. – pp. 1666-1703.

24. Talling P. J., & Sowter M. J. Erosion, deposition and basin-wide variations in stream power and bed shear stress [Article]. // *Basin Research*. – 1998. – Vol. 10 (1). – pp. 87-108. <https://doi.org/10.1046/j.1365-2117.1998.00088.x>

25. Zaalishvili V. B., Nevskaya N. I., Nevskii L. N., & Shempelev A. G. Geophysical fields above volcanic edifices in the North Caucasus. // *Journal of Volcanology and Seismology*. – 2015. – Vol. 9 (5). – pp. 333-338. <https://doi.org/10.1134/s0742046315050085>

References

1. Greater Caucasus in the Alpine era. Yu. G. Leonov. Moscow, GEOS, 2007. 368 p. (In Russ.)
2. Giorgobiani T. V. Conditions of formation of the alpine folded system of the Greater Caucasus and unique features of its structure. *Geology and Geophysics of Russian South*, 2019. Vol. 9 (1). pp. 43-57. DOI: 10.23671/VNC.2019.1.26787. (In Russ.)

3. Zaalishvili V. B., Chotchaev Kh. O. Complex analysis of geological data and of highspeed model MMS in the Central Caucasus sections. *Geology and Geophysics of Russian South*, 2016. No. 4. pp. 52-67. (In Russ.)
4. Zaalishvili V. B., Chotchaev Kh. O., Shempelev A. G. The characteristics of the geodynamic environment and elements of structural-material complexes of the Central Caucasus at a deep incision of Genaldon profile. *Geology and Geophysics of Russian South*, 2018. No. 4. pp. 58-74. (In Russ.)
5. Korchuganova N. I., Kostenko N. P., Mezhelevskii I. N. Neotectonic methods of prospecting for minerals. Ministry of Natural Resources of the Russian Federation, Geokart, MGGA. Moscow. 2001. 212 p. (In Russ.)
6. Frolova N. S., Korbutyak A. N., Mishakina A. A., Korpach S. V. Development of deformations in shear zones: results of physical modeling using sand. In: *Proceedings of the All-Russian conference with international participation. The fourth tectonophysical conference at the IPE RAS Tectonophysics and topical issues of earth sciences*. Vol. 2. Moscow, IPE RAS, 2016. pp. 385-392. (In Russ.)
7. Cheremnykh A. S. Shear fault zone in relief: analysis of digital models of experimental and natural objects. *Bulletin of ISTU*. 2014. No. 2 (85). pp. 92-103. (In Russ.)
8. Chotchaev Kh. O., Zaalishvili V. B., Nevskiy L. N., Shempelev A. G. Geomorphology as the heredity sign of the strutral features of the Earth's crust. *Geology and Geophysics of Russian South*, 2016. No. 1. pp. 141-158. (In Russ.)
9. Berendsen H. J. A., & Stouthamer E. Paleogeographic evolution and avulsion history of the Holocene Rhine-Meuse delta, The Netherlands [Article; Proceedings Paper]. *Geologie En Mijnbouw-Netherlands Journal of Geosciences*, 2002. Vol. 81 (1). pp. 97-112.
10. Davidson S. K., & Hartley A. J. Towards a quantitative method for estimating paleohydrology from clast size and comparison with modern rivers [Article]. *Journal of Sedimentary Research*, 2010. Vol. 80 (7-8). pp. 688-702. <https://doi.org/10.2110/jsr.2010.062>
11. Durkin P. R., Boyd R. L., Hubbard S. M., Shultz A. W., & Blum M. D. Three-dimensional reconstruction of meander-belt evolution, cretaceous McMurray formation, Alberta foreland basin, Canada [Article]. *Journal of Sedimentary Research*, 2017. Vol. 87 (10). pp. 1075-1099. <https://doi.org/10.2110/jsr.2017.59>
12. Gorbatikov A. V., Rogozhin E. A., Stepanova M. Y., Kharazova Y. V., Andreeva N. V., Perederin F. V., Zaalishvili V. B., Mel'kov D. A., Dzeranov B. V., Dzeboev B. A., & Gabaraev A. F. The pattern of deep structure and recent tectonics of the Greater Caucasus in the Ossetian sector from the complex geophysical data. *Izvestiya-Physics of the Solid Earth*, 2015. Vol. 51 (1). pp. 26-37. <https://doi.org/10.1134/s1069351315010073>
13. Gugliotta M., Flint S. S., Hodgson D. M., & Veiga G. D. Stratigraphic record of river-dominated crevasse subdeltas with tidal influence (Lajas formation, Argentina) [Article]. *Journal of Sedimentary Research*, 2015. Vol. 85 (3). pp. 265-284. <https://doi.org/10.2110/jsr.2015.19>
14. Horner S. C., Hubbard S. M., Martin H. K., & Hagstrom C. A. Reconstructing basin-scale drainage dynamics with regional subsurface mapping and channel-bar scaling, Aptian, Western Canada Foreland Basin [Article]. *Sedimentary Geology*, 2019. Vol. 385. pp. 26-44. <https://doi.org/10.1016/j.sedgeo.2019.03.012>
15. Kirchner K. The Dyje Canyon-like Valley: Geomorphological Landscape of Deep Valley at the Eastern Part of the Marginal Slope of Bohemian Massif. In T. Panek & J. Hradecky (Eds.). *Landscapes and Landforms of the Czech Republic*, 2016. pp. 233-247. https://doi.org/10.1007/978-3-319-27537-6_19
16. Miqueloni D. P., & Bueno C. R. P. (Multivariate analysis and spatial variability to estimate soil erodibility of an anfiisol. *Revista Brasileira De Ciencia Do Solo*, 2011. Vol. 35 (6). pp. 2175-2182. <https://doi.org/10.1590/s0100-06832011000600032>
17. Nesje A., Dahl S. O., Valen V., & Ovstedal J. Quaternary erosion in the Sognefjord drainage-basin, Western Norway. *Geomorphology*, 1992. No. 5 (6). pp. 511-520. [https://doi.org/10.1016/0169-555x\(92\)90022-g](https://doi.org/10.1016/0169-555x(92)90022-g)

18. Raczowska Z., Bucala-Hrabia A., & Prokop P. Geomorphological and sedimentological indicators of land degradation (Meghalaya Plateau, NE India). *Land Degradation & Development*, 2018. Vol. 29 (8). pp. 2746-2759. <https://doi.org/10.1002/ldr.3020>
19. Ramsay J. G. Shear zone geometry: a review. *J. of Struct. Geol.* 1980. Vol. 2. No. 1-2. pp. 83-99.
20. Rogozhin E. A., Gorbatiykov A. V., Zaalishvili V. B., Stepanova M. Y., Andreeva N. V., & Kharazova Y. V. New data on the deep structure, tectonics, and geodynamics of the Greater Caucasus. *Reports Earth Sciences*. 2015. Vol. 462 (1). pp. 543-545. <https://doi.org/10.1134/S1028334X15050244>
21. Serrat P. The Aglyriver: long-term evolution and present fluvial dynamics of a coastal stream. *Houille Blanche-Revue Internationale De L Eau*. 2003. No. 5. pp. 137-146. <https://doi.org/10.1051/lhb/2003104>
22. Shempelev A. G., Zaalishvili V. B., & Kukhmazov S. U. Deep structure of the western part of the Central Caucasus from geophysical data. *Geotectonics*, 2017. Vol. 51 (5). pp. 479-488. <https://doi.org/10.1134/S0016852117050053>
23. Sylvester A. G. Strike-slip faults. *Geol. Soc. of Amer. Bull.*, 1988. Vol. 100. No. 11. pp. 1666-1703.
24. Talling P. J., & Sowter M. J. Erosion, deposition and basin-wide variations in stream power and bed shear stress [Article]. *Basin Research*, 1998. Vol. 10 (1). pp. 87-108. <https://doi.org/10.1046/j.1365-2117.1998.00088.x>
25. Zaalishvili V. B., Nevskaya N. I., Nevskii L. N., & Shempelev A. G. Geophysical fields above volcanic edifices in the North Caucasus. *Journal of Volcanology and Seismology*, 2015. Vol. 9 (5). pp. 333-338. <https://doi.org/10.1134/S0742046315050085>

УДК 551.2:031.1 (479.24)

DOI: [10.46698/VNC.2020.36.81.003](https://doi.org/10.46698/VNC.2020.36.81.003)

Original paper

Redefinition of Earthquake Hypocenters by the Double Difference Method

S. E. Kazimova 

Republican Seismic Survey Center, National Academy of Sciences of Azerbaijan
123 Guseyn Javid Str., Baku 1001, Azerbaijan, e-mail: sabina.k@mail.ru

Received: 02.11.2020, revised: 26.11.2020, accepted: 04.12.2020

Abstract: Relevance. In the last decade, significant advances have been made in the theory and application of seismic tomography. These include refinements in model parameterization, 3D ray tracing, an inversion algorithm, sharing local, regional, and teleseismic data, and adding transformed and reflected waves to tomographic inversion. Explorations have shown that with the help of seismotomography it is possible to obtain reliable data on the deep structure of the Earth, its thickness, the mutual arrangement of layers, as well as tectonic structures identified in the earth's crust. Due to a significant increase in the number of seismic stations in the Republican Seismic Survey Center and equipping them with modern instruments of the MacOs system (made by "Kinometrics"), it was possible to obtain a large volume of observed seismic material and solve rather complex methodological issues, which is relevant today. **The aim** of this article is to redefine the data of the hypocenters of earthquakes that occurred on the territory of Azerbaijan for the period 2010-2019 ($m_l > 2.0$) and calculate the velocity model of the earth's crust using algorithms that are not included in the mandatory processing when compiling a catalog of seismic events. The catalog data were taken from the "Bureau of Earthquake Research" of the Republican Seismic Survey Center of Azerbaijan National Academy of Sciences. **Research methods.** Within the framework of present work, using the double difference method, we redefined the location of seismic events, showing that the obtained positions of the epicenters are lined up in systems of linear chains along the main and feathering faults, which is consistent with the relief and geological concepts. **Results.** Comparing the values of the velocities with the values of the one-dimensional velocity model, it was found that at depths of 5-10 km, there is good convergence in the regions of the Greater Caucasus. The middle Kura depression is mainly characterized by low velocities compared to the one-dimensional velocity model. At a depth of 15 km, the eastern part of the Middle Kura depression is characterized by good convergence, but in the western part high velocities are noted. The maximum convergence of velocities was noted at a depth of 35 km.

Keywords: seismic tomography, double difference method, travel times of seismic waves.

For citation: Kazimova S. E. Redefinition of Earthquake Hypocenters by the Double Difference Method. *Geologiya i Geofizika Yuga Rossii = Geology and Geophysics of Russian South*. 2020. 10 (4): 41 – 51. DOI: [10.46698/VNC.2020.36.81.003](https://doi.org/10.46698/VNC.2020.36.81.003).

DOI: [10.46698/VNC.2020.36.81.003](https://doi.org/10.46698/VNC.2020.36.81.003)

Оригинальная статья

Уточнение гипоцентров землетрясений методом двойной разности

С. Э. Казымова 

Республиканский Центр Сейсмологической Службы, Национальная Академия Наук
Азербайджана, Республика Азербайджан, 1001, Баку, ул. Гусейн Джавида, 123, e-mail:
sabina.k@mail.ru

Статья поступила: 02.11.2020, после рецензирования: 26.11.2020, принята к публикации: 04.12.2020

Резюме: Актуальность работы. В последнее десятилетие были достигнуты значительные успехи в теории и применении сейсмотомографии. К ним относятся уточнения в параметризации модели, трассировка трехмерных лучей, алгоритм инверсии, совместное использование локальных, региональных и телесеизмических данных, а также добавление преобразованных и отраженных волн в томографическую инверсию. Исследования показали, что с помощью сейсмотомографии можно получить достоверные данные о глубинном строении Земли, ее толщине, взаимном расположении слоев, а также о тектонических структурах, выявленных в земной коре. Благодаря значительному увеличению числа сейсмических станций в РЦСС, оснащению их современными приборами системы MacOS (фирмы «Кинеметрикс»), удалось получить большой объем наблюдаемого сейсмического материала и решить довольно сложные методические вопросы, что является актуальным на сегодняшний день. **Целью** данной статьи является переопределение данных гипоцентров землетрясений произошедших на территории Азербайджана за период 2010-2019 гг. ($m_l > 2,0$) и вычислению скоростной модели земной коры с использованием алгоритмов, не входящих в обязательную обработку при составлении каталога сейсмических событий. Данные каталога были взяты в «Бюро исследований землетрясений» РЦСС при НАНА. **Методы исследования.** В рамках данной работы методом двойных разностей мы переопределили положения сейсмических событий, показав, что полученные положения эпицентров выстраиваются в системы линейных цепочек, положение которых согласуется с рельефом и геологическими представлениями, располагаясь вдоль главного и оперяющих разломов. **Результаты работы.** Сопоставляя значения скоростей со значениями одномерной скоростной модели, установлено что на глубинах 5-10 км наблюдается хорошая сходимость в областях Большого Кавказа. Среднекуринская депрессия в основном характеризуется малыми скоростями по сравнению с одномерной скоростной моделью. На глубине 15 км восточная часть Среднекуринской депрессии характеризуется хорошей сходимостью, однако в западной части отмечены завышенные скорости. Максимальная сходимость скоростей отмечена на глубине 35 км.

Ключевые слова: сейсмическая томография, метод двойных разностей, времена пробега сейсмических волн.

Для цитирования: Казымова С. Э. Уточнение гипоцентров землетрясений методом двойной разности. *Геология и геофизика Юга России*. 2020. 10 (4): 41 – 51. DOI: 10.46698/VNC.2020.36.81.003.

Introduction

One of the main tasks in processing seismological observation data is to maximize the accuracy of determining the spatial position and mechanisms of earthquake sources. Among the main parameters of the focus, the most interesting is the depth of the

hypocenter, which, as a rule, is determined with the least accuracy. Knowledge of the exact spatial position of the foci makes it possible to reveal their connections with the features of the deep structure of the earth's crust, primarily with active faults – the main zones of generation of destructive earthquakes [Konovalov et al., 2007; Solov'ev et al., 2003].

Studies of recent decades show that seismic methods are the main and most reliable in the study of the internal structure and physical properties of the Earth. These methods, in turn, are divided into two groups:

1) methods based on the use of the arrival times of body waves arising from earthquakes and explosions;

2) methods based on the use of the spectral properties of seismic waves and, in particular, the dispersion of the velocities of Rayleigh and Love surface waves.

Seismic tomography is an imaging technique that uses seismic waves generated by earthquakes and explosions to create 3D images of the interior of the Earth. If the Earth had a uniform composition and density, seismic rays would travel in straight lines. But our planet has a multilevel structure, as a result of which seismic rays propagating through various boundaries are refracted and reflected.

In the last decade, significant advances have been made in the theory and application of seismic tomography. These include refinements in model parameterization, 3D ray tracing, an inversion algorithm, sharing local, regional, and teleseismic data, and adding transformed and reflected waves to tomographic inversion. Studies have shown that with the help of seismotomography it is possible to obtain reliable data on the deep structure of the Earth, its thickness, the mutual arrangement of layers, as well as tectonic structures identified in the earth's crust. Owing to a significant increase in the number of observation points, equipping them with modern instruments, as well as the progress of computer technology, it was possible to obtain a large amount of observational material and solve rather complex methodological issues. Tomographic images of faults in earthquake zones, in regions such as Japan and California, show that the processes of initiation of ruptures and earthquakes are closely related to inhomogeneities of crustal materials and inelastic processes in fault zones, such as fluid migration.

The first works in the field of studying seismic tomography from body wave data belong to K. Aki and Lee V. [Aki et al., 1977; Aki, Lee, 1976] for the local and regional scale, and also A. Dziewonski [Dziewonski, 1984; Dziewonski et al., 1977] for the global scale. Surface wave tomography was initiated by Y. Nakanishi and D. Anderson [Anderson, Dziewonski, 1984], J. Woodhouse and A. Dziewonski [Woodhouse, Dziewonski, 1984] and T. Tanimoto and D. Anderson [Tanimoto, Anderson, 1984]. Surface wave tomography is more suitable for large-scale regional studies.

The purpose of this article is to redefine the data of the hypocenters of earthquakes that occurred on the territory of Azerbaijan for the period 2010-2019. ($m_l > 2.0$) and calculation of the velocity model of the earth's crust using algorithms that are not included in the mandatory processing when compiling a catalog of seismic events.

Thus, due to a significant increase in the number of seismic stations in the RCSS, equipping them with modern instruments of the MacOS system (firms "Kinemetrix"), it was possible to obtain a large amount of observed seismic material and solve rather complex methodological issues, which is relevant today.

Double Difference Method (TomoDD)

The method of seismic tomography with double differences, or as it is commonly called DD tomography, allows one to analyze and compare the obtained velocity model and the positions of the hypocenters of the aftershock sequence with block-dividing faults and discontinuous deformations mapped on the surface.

The double difference method [Konovalov et al., 2007; Shikhalibeyli et al., 1956; Waldhauser, Ellsworth, 2001] is effective for joint redefinition of hypocenters in the case of a set of closely spaced foci and allows simultaneous redefinition of the locations of a large number of earthquake hypocenters at relatively large distances from the observing stations. In this case, the difference in the travel times of a wave from two close events is determined by the difference in the position of the hypocenters of these events. Thus, it is possible to refine the distance between events without using station corrections.

If the distance between the hypocenters of two earthquakes is small in comparison with the distance between the earthquake sources and the station, as well as the wavelength, then the ray paths from the source region coincide throughout almost the entire ray. In this case, the difference in travel times for the two observed events can be attributed to the spatial difference in the location of the sources. Let's formalize this approach. The calculated arrival time (P- or S-waves) from the i -th earthquake, observed at the k -th seismic station, is expressed, in the framework of ray theory, as the integral of the path along the ray:

$$T_k^i = \tau_0^i + \int_i^k u ds, \quad (1)$$

where τ_0^i is the time at the source of the i th event, u is the deceleration field along the ray path, and ds is the path length element. Due to nonlinear relationships between travel times and positions of earthquakes, in the general case, truncated Taylor series [Geiger, 1912] are used to linearize equation (1). In this case, the difference in travel times for the i th event is linearly related to the disturbances Δm^i (to the four current hypocentral parameters Δx^i , Δy^i , Δz^i , Δt^i for each observed k):

$$\frac{\partial t_k^i}{\partial m} \Delta m^i = r_k^i, \quad (2)$$

where $r_k^i = (t_k^{obs} - t_k^{cal})^i$, t_k^{obs} and t_k^{cal} are the measured and calculated travel times, respectively, and $\Delta m^i = (\Delta x^i, \Delta y^i, \Delta z^i, \Delta \tau^i)$. Equation (2) is used in conjunction with the measured arrival times. However, cross-correlation methods determine the difference in arrival times between events $(t_k^i - t_k^j)^{obs}$, therefore equation (2) cannot be used directly. Considering the difference between equations (2) for a pair of events, the equation for the relative differences between the hypocenters of earthquakes i and j can be written in the form

$$\frac{\partial t_k^{ij}}{\partial m} \Delta m^{ij} = dr_k^{ij}, \quad (3)$$

where $\Delta m^{ij} = (\Delta dx^{ij}, \Delta dy^{ij}, \Delta dz^{ij}, \Delta d\tau^{ij})$ – change in relative positions between two hypocenters i and j , partial derivatives of T with respect to m are the components of the slowness vector along the ray connecting the source and the receiver, measured at the source [Aki, Richards, 1983]. The system of linear equations (2) with four unknowns Δm^i (three hypocentral parameters and time at the source) is solved by the least squares

method using an iterative approach. First, a solution is set in the form of calculated travel times for the phases under consideration (in a certain region where the source is supposedly localized), which is then checked to find corrections to the initially specified position, then the corrected solution is the input, etc. This method was first proposed by Geiger [Geiger, 1912]. The iterative process usually converges quickly if the initial determination of the hypocenter is close to the true location. The calculations mainly use a one-dimensional velocity model of the structure of the earth's crust. The accuracy of determining the coordinates of hypocenters depends on the geometry of the network, available phases, the accuracy of measuring the arrival times and the velocity model of the structure of the earth's crust [Gomberg et al., 1990; Pavlis, 1992]. Using a one-dimensional velocity model to determine coordinates limits accuracy, as three-dimensional variations in seismic velocities can introduce systematic biases in the calculated travel times. Partial consideration of the velocity variation is possible by making a station correction to the calculation algorithm or to the velocity model of the earth's crust [Douglas, 1967; Douglas, 1967; Pujol, 1988].

One-dimensional velocity model

To calculate the velocity along the entire path of propagation of the wave beam, the time required for the seismic wave to arrive at the seismic station after the earthquake is used. Using the arrival times of various seismic waves, areas of slower (where waves slow down) or faster velocity zones at different depths of the Earth are determined. Various properties of the earth's crust control the speed and absorption of seismic waves. Seismic waves travel at speeds of several kilometers per second on Earth, with compression waves (P-waves) about 1.75 times faster than shear waves (S-waves). In addition, seismic wave velocities vary with the type and density of the rock.

With the advent of a denser network of digital stations on the territory of Azerbaijan, it became possible to apply techniques that allow obtaining more accurate solutions for local observations of individual seismogenic zones. The accuracy of determining the positions of hypocenters in the earth's crust can be increased by improving the one-dimensional velocity model of the earth's crust embedded in the algorithms. It is thanks to the velocity model that we can calculate the travel time of waves and the distance from the source to the seismological station [Yemanov et al., 2003]. At the same time, the discrepancy between the velocity model and the real environment introduces, perhaps, the biggest error in the calculation of the coordinates of seismic events. To clarify the position of the earthquake hypocenters in our previous works, we used the Velest program. [five]. To this end, we introduced a more accurate layered velocity model into the calculations, which made it possible to obtain more accurate absolute solutions. In this work, we used the double difference method, which is not very sensitive to the parameters of the model and gives a fairly accurate relative solution. The layered model presented in Table 1 was used as a reference model.

Results of redetermination of earthquake hypocenters by the double difference method

We have performed redefinition of the position of seismic events by the method of double differences [Yemanov et al., 2003; Poupinet et al., 1984; Waldhauser, Ellsworth, 2000]. The method of double differences gives a very accurate relative solution, that

*Table 1***One-dimensional velocity model used in calculating hypocenter positions**

Depth interval, km	Density, g / cm ³	P-wave velocity, km / s	S-wave velocity, km / s
3	2.3	3.88	2.25
5	2.4	4.21	2.57
7	2.5	4.38	2.57
10	2.7	5.9	3.26
15	2.9	6.4	3.55
23	2.9	6.68	3.82
34	3.0	7.09	3.97
44	3.0	7.35	3.97
50	3.0	7.52	4.64
60	3.3	8.52	4.79

is, after the redefinition, the relative positions of events are established very accurately, while the entire redefined cluster can move to the side. This method arranges the scattered initial epicenters into narrow linear zones [Gol'din et al., 2003]. The calculations involved only those events that have a sufficient number of joint observations with neighboring events, i. e. at least 8 joint observations for each pair of events.

Thus, the relative position of 2572 events was redefined. The catalog of earthquakes was taken from the "Bureau of Earthquake Research" of the RCSS at ANAS. For redefinition, only data from the catalog of events and arrival times were used; cross-correlation differences in the travel times of seismic waves were not used.

We present hypocentral solutions that were made with the HYPODD program [Waldhauser, 2000] using a velocity model obtained from seismic tomography data [Kazimova, Kazimov, 2017]. This technique is used for the first time to determine hypocenters in the territory of Azerbaijan. Note that for both P and S waves we used only the first wave arrivals, the interpretation of whether the wave is direct or refracted (head) depends entirely on the velocity model. The technique used in standard processing has some advantage in this sense: it uses both forward and head waves. This advantage manifests itself in the case of a sparse regional network of stations, where, for a seismic event, most stations are located at a distance at which the head wave appears.

In the calculations, a rough approximation of the solution is first calculated using all data and a fixed depth, then it begins to be refined iteratively. When an accurate epicentral solution is reached, the depth is released and depth determination begins. In the course of calculations, at a given iteration, filtering and weighting of data is turned on by two parameters: by residual and distance [Yemanov et al., 2011; Telesca et al., 2018]. When weighting by distance, at a certain iteration, observations at stations located further than a certain distance from the epicenter are removed from the calculations, and the rest of the data are weighed. We used 250 kilometers as the cut-off distance, only in some cases we increased it to capture more stations.

Figures 2 and 3 show the definitions of earthquake epicenters in the territory of Azerbaijan before and after processing.

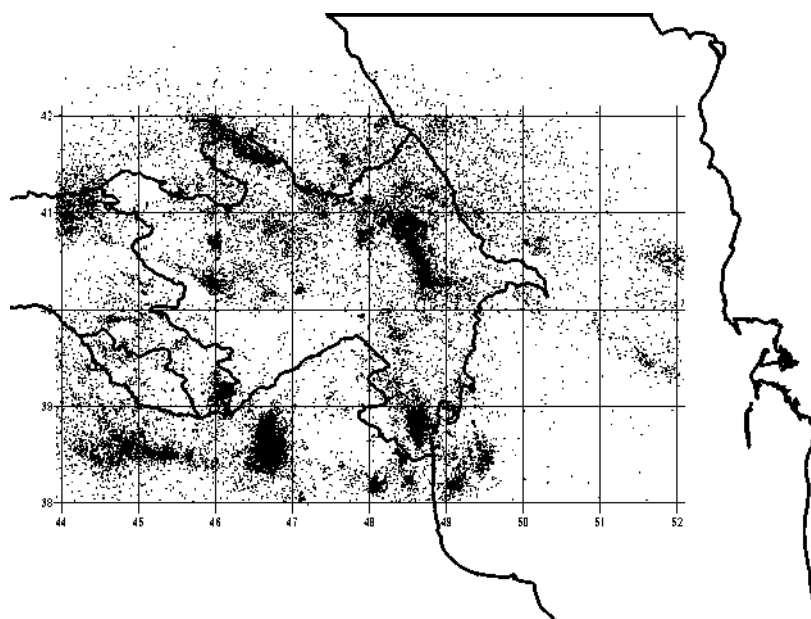


Fig. 2. Map of the epicenters of earthquakes obtained by the standard processing method

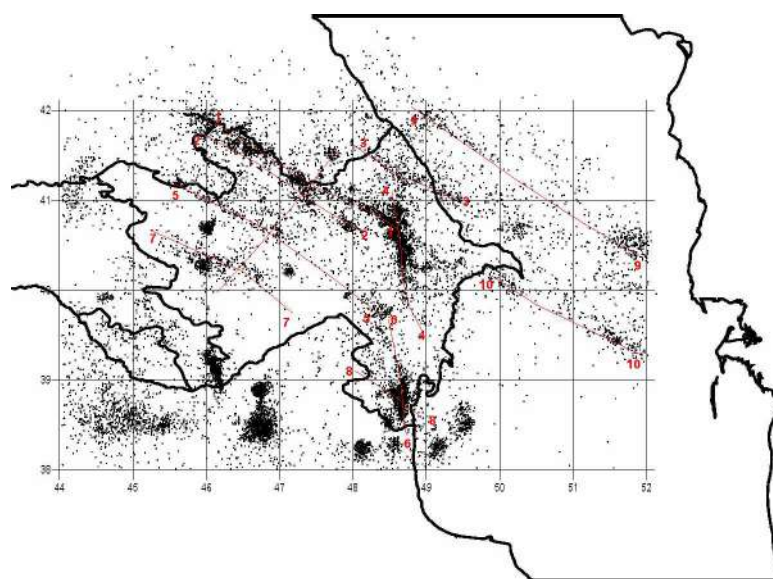


Fig. 3. Redefining the positions of hypocenters by the method of double differences. Fault tectonics based on [Kengerli, 2007; Shikhalibeyli, 1956].

Tectonic faults: 1 – Dashgil-Mudresa; 2 – Vandam; 3 – Siyazan; 4 – West Caspian; 5 – Kura; 6 – Astara-Derbend; 7 – Pre-Lesscaucasian; 8 – Pre-Talysh; 9 – Makhachkala-Krasnovodsk; 10 – Sangachal-Ogurchu.

Figure 3 shows how the accuracy of the resulting solution improves and how linear structures begin to emerge. So, the positions of the epicenters obtained by the method of double differences are aligned linearly or pointwise, and this linearity is consistent with the relief and geological representations. In the southern part of the region, the seismogenic zones of northern Iran and Talysh are well localized. In the zone of the Greater Caucasus, NW to SE, a zone of foci is formed corresponding to the Vandamand Dashgil-Mudresa longitudinal tectonic faults. In the Shamakhi-Ismaili zone, there is an area crossing the

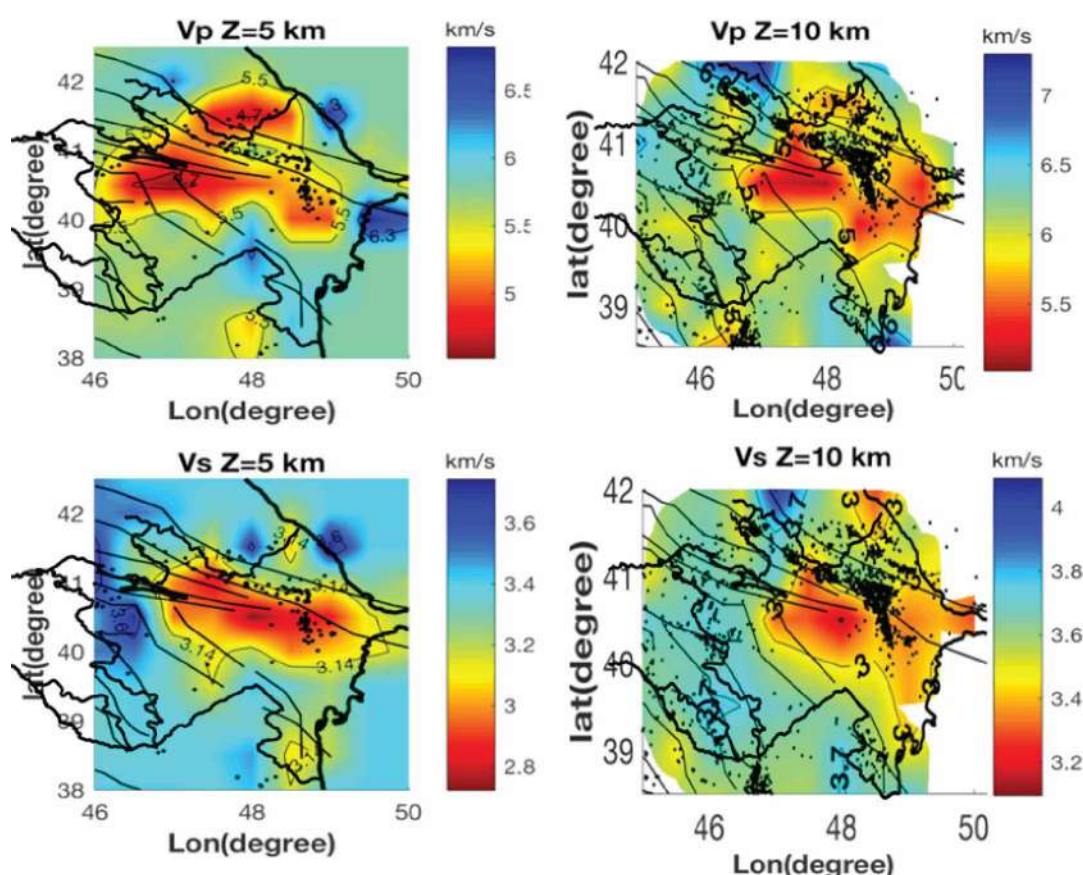


Fig. 4. Horizontal sections of the spatial velocity model at the depths of the earth's crust 5-10 km (Compiled by R. D. Kerimova).

Vandam fault, corresponding to an active orthogonal West Caspian fault. Then, using the algorithms of the TomoDD program, spatial velocity models were calculated (Fig. 4-5).

At the depth of 5 km, the region of minimum velocities is noticeably distinguished – the Vandam and Zakatala-Kovdag zones of the Greater Caucasus and the Pre-Caucasian zone of the Middle Kura depression, characterized by the values of P-wave velocities of 4.5-5.5 km/s. Despite the fact that at a depth of 10 km the values of velocities increase, however, the general trend of velocity anomalies remains. Basically, the territory of the Middle Kura depression is characterized by P-wave velocities of 5.9-6.1 km/s. The figure clearly shows two intervals of speeds. The zone of the Less Kura megazone, as well as the eastern part of the Vandam and Zakatala-Kovdag zones of the Greater Caucasus, are characterized by the values of the P-wave velocities of 5.5 km/s. The zone of Sheki and Zakatala-Balakan and Nakhchivan regions was distinguished by the maximum values of velocities, with the values of the velocities of longitudinal waves 6.5-7.0 km/s.

In fig. 5 shows a horizontal cross-section of the velocity distribution at a depth of 15 and 17.5 km. As seen in the figure, the distribution of velocities has a mosaic character. At a depth of 15 km, the zone of maximum values in the Sheki region has expanded and is widespread (7.0 km/s). The central part of the Vandam and Zakatala-Kovdag zones of the Greater Caucasus, as well as the border zone with Dagestan, characterized by the velocities of longitudinal waves of 5.5-6.0 km/s, are marked with the minimum values.

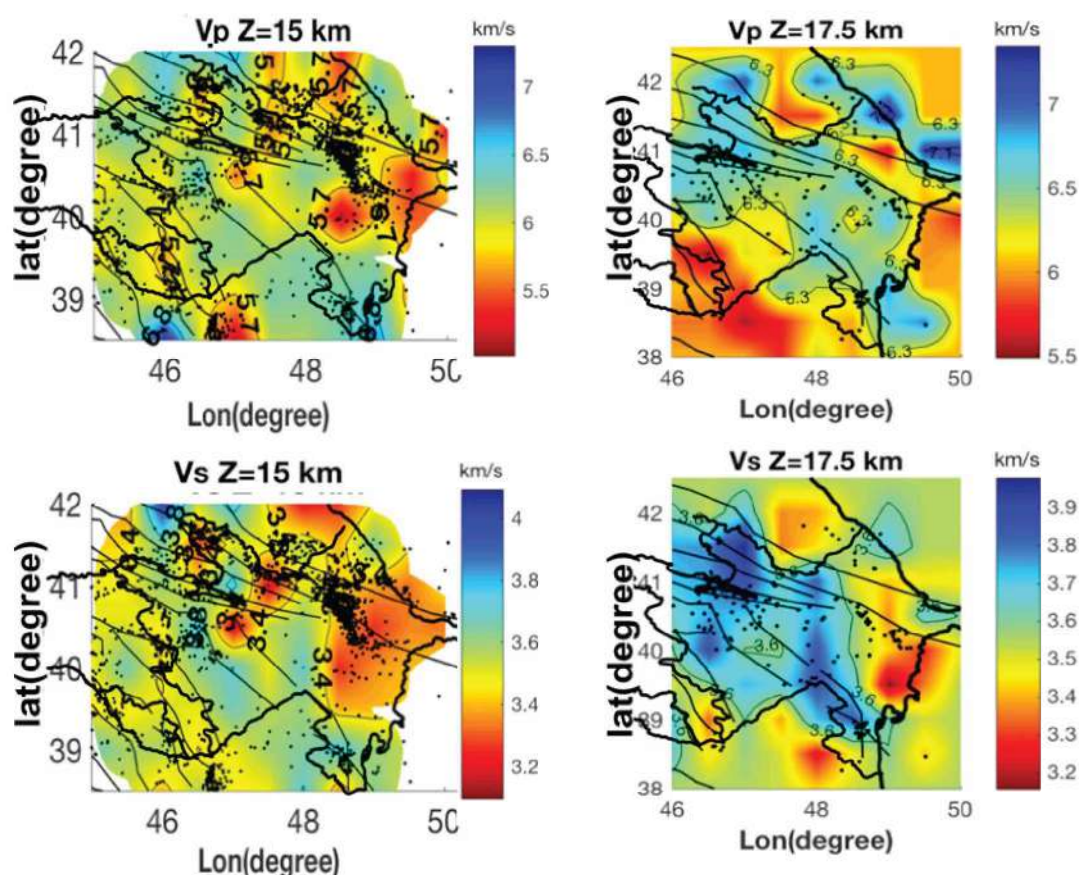


Fig. 5. Horizontal sections of the spatial velocity model at the depths of the earth's crust 15-17.5 km.
(Compiled by R. D. Kerimova)

Conclusions

Comparing the values of the velocities with the values of the one-dimensional velocity model, it was found that at depths of 5-10 km, there is good convergence in the regions of the Greater Caucasus. The middle Kura depression is mainly characterized by low velocities compared to the one-dimensional velocity model. In the depth interval of 7-10 km, the roof of the pre-Alpine basement is revealed. In this interval, a decrease in velocity is observed in the Evlakh-Agdzhabedi and Kurdamir-Saatli zones of the Middle Kura depression, which indirectly confirms the fracturing of rocks and the presence of a decompaction zone. At a depth of 15 km, the interface between the two media is also revealed. The velocities in this interval increase from 6.2 km/s to 7.0 km/s. According to the literature, the velocities of 6.0-6.2 km/s correspond to edges, and 6.5-7.6 are characteristic of basalts. As you can see in the figures, different parts of the region are characterized by different speeds. However, the regularity of the distribution of speeds in general for the region is observed. It is important to note that not all velocity boundaries in the volcanic strata are determined by the change in the material composition of the rocks. Some boundaries are associated with different stressed state of matter at depth, with the superposition of secondary processes of metamorphism, with a change in the physical state of matter, they can be caused by rheological stratification. It can be noted that these depths reflect the surface of the substrate, formed over most of the region under consideration from metamorphosed rocks of the pre-Alpine basement, and in some

areas from consolidated volcanic and metamorphosed rocks of the Mesozoic. In the depth interval of 17-25 km, the top of the basalt layer of the earth's crust is revealed. At a depth of 35 km, the Moho border. Based on the data obtained, it can be noted that the first interval from 5 to 17 km is associated with the boundary of the Kainazoi and Mesozoic deposits in the sedimentary cover, the second (17-25 km) – with the top of the consolidated part of the earth's crust (granite layer), the third (25-35 km) – refers to the basalt layer, the fourth (> 35 km) is associated with the upper boundary of the Moho (8-8.5 km/s).

In the course of the calculations, a modern improved approach to modeling the velocity field in the crust and upper mantle of the territory of Azerbaijan was applied, including the selection of data, determination of the optimal one-dimensional model, recalculation of the earthquake hypocenters relative to the found optimal one-dimensional model and the calculation of the spatial velocity model. The applied data processing system provided for the verification of compliance with the selection criteria before the calculations and during the calculations, which made it possible to reduce the a priori error introduced by the data into the solution.

References

1. Aki K., Richards P. Quantitative seismology. Theory and methods. In 2 volumes. Translated from English. Moscow. Mir, 1983, 880 p. (In Russ.)
2. Gol'din S. V., Seleznev V. S., Emanov A. F., Filina A. G. et al. Chuya earthquake of 2003 (M = 7.5). Online scientific information journal "Bulletin of the Department of Earth Sciences RAS". 2003. No. 1 (21). URL: http://www.segis.ru/russian/cp1251/h_dgggms/1-2003/screp-7.pdf (In Russ.)
3. Emanov A. F., Leskova E. V. et al. Aftershock process of the Chuya earthquake of 27.09.2003. Dynamics of the physical fields of the Earth. 2011. pp. 173-185. (In Russ.)
4. Yemanov A. A., Valdhauser F., Leskova E. V. Application of the method of double differences to refine the coordinates of seismic events. In: Problems of seismology of the 11th millennium. Proceedings of int. geoph. conf. (Novosibirsk, September 15-19, 2003). Novosibirsk. Publ. SB RAS, 2003. pp. 161-168. (In Russ.)
5. Kazimova S. E., Kazimov I. E., Influence of one-dimensional velocity models on the determination of the main parameters of earthquake sources in Azerbaijan, Physics of the Earth, "Nauka", 2017, No. pp. 72-86. (In Russ.)
6. Kengerli T. N. Features of the geological and tectonic structure of the Southeastern Caucasus and issues of oil and gas content. *Elmiasərlər* (State Oil Company of the Republic of Azerbaijan). 2007. No. 9. pp. 3-12. (In Russ.)
7. Konovalov A. V. et al. The structure and features of the seismic regime of the focal zone of the Takoy earthquake of September 1, 2001 (M w 5.2). *Pacific Geology*. 2007. Vol. 26. No. 2. pp. 93-101. (In Russ.)
8. Solov'ev V. M., Seleznev V. S., Duchkov A. D., Liseikin A. V. Deformation-strength zoning of the earth's crust of the Altai-Sayan folded region. In: Problems of seismology of the 3rd millennium. Proceedings of the int. geoph. conf., Novosibirsk, 15-19 Sept. 2003 Novosibirsk, Publ. SB RAS, 2003. (In Russ.)
9. Shikhalibeyli E. Sh. Geological structure and development of the Azerbaijan part of the southern slope of the Greater Caucasus. Baku. Academy of Sciences of Azerbaijan SSR, 1956. 218 p. (In Russ.)
10. Aki K., Christoffersson A., Husebye E. Determination of the three-dimensional seismic structure of the lithosphere. *Journal of Geophysical Research*, 1977. Vol. 82. pp. 277-296.
11. Aki K., Lee W. Determination of three dimensional velocity anomalies under a seismic array using first P arrival times from local earthquakes, 1, A homogeneous initial model. *Journal of Geophysical Research*, 1976. Vol. 81. pp. 4381-99.

12. Anderson D., Dziewonski A.M. Seismictomography. *Scientific American*, 1984. Vol. 251. pp. 60-80.
13. Douglas A. Joint epicenter determination. *Nature*, 1967. Vol. 215. pp. 47-48.
14. Douglas A., Bowers D., and Young J. B. On the onset of P seismograms. *Geophys. J. Int.*, 1997. Vol. 129. pp. 681-690
15. Dziewonski A., Hager B., O'connell R. Large-scale heterogeneities in the lower mantle. *Journal of Geophysical Research*, 1977. Vol. 82. pp. 239-55
16. Dziewonski A.M. Mapping the lower mantle: determination of lateral heterogeneity in P velocity up to degree and order 6. *Journal of Geophysical Research*, 1984. Vol. 89. pp. 5929-52.
17. Geiger L. Probability method for determination of earthquake epicenters from the arrival times only. *Bul. St. Louis Univ*, 1912. Vol. 8. pp. 60-71.
18. Gombert J. S., Shedlock K. M., and Roecker S. W. The effect of S-wave arrival times on the accuracy of hypocenter estimation. *Bull. Seism. Soc. Am.*, 1990. Vol. 80. pp. 1605-1628.
19. Paige C. C., Saunders M. A. LSQR: An algorithm for sparse linear equations and sparse least squares. *ACM Transactions on Mathematical Software (TOMS)*, 1982. T. 8. No. 1. pp. 43-71.
20. Pavlis G. L. Appraising relative earthquake location errors. *Bull. Seism. Soc. Am.*, 1992. Vol. 82. pp. 836-859.
21. Poupinet G., Ellsworth W. L., and Fre'chet J. Monitoring velocity variations in the crust using earthquake doublets: an application to the Calaveras fault, California. *J. Geophys. Res.*, 1984. Vol. 89. pp. 5719-5731.
22. Pujol J. Comments on the joint determination of hypocenters and station corrections. *Bull. Seism. Soc. Am.*, 1988. Vol. 78. pp. 1179-1189.
23. Tanimoto T., Anderson D. Mapping convection in the mantle. *Geophysical Research Letters*, 1984. Vol. 11. pp. 287-90.
24. Telesca L., Kadirov F., Yetirmishli G., Safarov R., Kazimova S. Joint Use of Seismological and Topological Statistical Methods for the Analysis of 2010-2016 Azerbaijan Seismicity. *Pure and Applied Geophysics, On-line*, 2018. Vol. 175. pp. 4225-4239
25. Waldhauser F., Ellsworth W. L. A double-difference earthquake location algorithm: Method and application to the Hayward Fault, California, *Bull. Seism. Soc. Am.*, 2000. Vol. 90. pp. 1353-1368
26. Waldhauser F., Ellsworth W. L. HypoDD – A Program to Compute Double-Difference Hypocenter Locations. *US Geological Survey, Open-File Report*, 2001. 113 p.
27. Woodhouse J., Dziewonski A. Mapping the upper mantle: three-dimensional modeling of earth structure by inversion of seismic waveforms. *Journal of Geophysical Research*, 1984. Vol. 89. pp. 5953-86.

ГЕОТЕКТНИКА И ГЕОДИНАМИКА

УДК: 550.34.013.4, 551.24

DOI: [10.46698/VNC.2020.92.72.004](https://doi.org/10.46698/VNC.2020.92.72.004)

Оригинальная статья

Геодинамика и геотермия Прикаспийской впадины и восточного сегмента Кавказского региона

В. Б. Свалова 

Институт геоэкологии им. Е. М. Сергеева РАН, Россия, 101000, Москва, Уланский
переулок, 13, к. 2, e-mail: v-svalova@mail.ru;

Геофизический институт Владикавказского научного центра Российской академии наук,
Россия, 362002, РСО-Алания, г. Владикавказ, ул. Маркова, 93а

Статья поступила: 20.09.2020, доработана: 14.10.2020, одобрена в печать: 20.11.2020

Резюме: Актуальность работы определяется важностью оценки и прогноза нефтегазового потенциала глубоких осадочных бассейнов, в частности, глубоких горизонтов структур, не всегда доступных глубокому бурению в поисковых и разведочных целях. **Цель и методы исследования.** Наряду с прикладными вопросами целью исследования являются фундаментальные вопросы теоретической геодинамики формирования и эволюции осадочных бассейнов в связи с подъемом мантийных диапиров на основе методов механико-математического моделирования. Прикаспийская впадина и восточный сегмент Кавказского региона, включая Каспийское море, могут рассматриваться как регионы окрестности восточной части Альпийского пояса, который в свою очередь является западной частью Альпийско-Гималайского пояса, простирающегося от западной оконечности Средиземного моря до Тихоокеанского побережья. Каспийское море пересекает с севера на юг серию широтных структурных зон юго-восточной окраины древней докембрийской Восточно-Европейской платформы, молодой эпигерцинской Скифско-Туранской платформы и современного Альпийско-Гималайского орогенного пояса. Прикаспийская и Южно-Каспийская впадины являются глубокими осадочными бассейнами с толщиной осадочного чехла более 20 км, обладающими высоким нефтегазовым потенциалом и большим народно-хозяйственным значением. Формирование и эволюция осадочного бассейна служат ключом для определения зон нефтегенерации осадочного чехла, что делает задачу изучения геодинамики осадочных бассейнов крайне важной и необходимой. Геодинамика рельефа поверхности определяется глубинными мантийными движениями. Механико-математическая модель динамики литосферы дает возможность количественно связать параметры формирующегося осадочного бассейна с подъемом мантийного диапира. Анализ геофизических полей геологических структур позволяет оценить подъем астеносферы, а разработанная самоспряженная термогравиметрическая модель литосферы делает эти оценки надежными и достоверными. Геодинамика и история развития геологических структур определяют магматизм, вулканизм, сейсмичность, геотермические характеристики, геотермальную активность, нефтегазоносность, опасные природные процессы региона, что в свою очередь является обоснованием создания системы комплексного экологического мониторинга на фундаментальной научной базе, прогноза и предупреждения природных бедствий и катастроф, а также поиска полезных ископаемых, включая углеводороды. **Результатом работы** является количественная оценка подъема астеносферы под осадочным бассейном на примере Прикаспийской впадины.

Ключевые слова: осадочные бассейны, моделирование, геотермия, геодинамика, гравиметрия, Прикаспийская впадина, Каспийское море, Южно-Каспийская впадина, Кавказский регион, сейсмоотография.

Для цитирования: Свалова В.Б. Геодинамика и геотермия Прикаспийской впадины и восточного сегмента Кавказского региона. *Геология и геофизика Юга России*. 2020. 10 (4): 52 – 69. DOI: 10.46698/VNC.2020.92.72.004.

Благодарности: Работа выполнена при поддержке гранта Российского научного фонда (проект № 1947-02010, «Natural hazards and monitoring for mountain territories in Russia and India») и темы НИР (№ 0142-2014-0027 «Развитие теории и методов изучения новейшей тектоники и современной геодинамики платформенных и орогенных территорий применительно к оценке их безопасности»).

GEOTECTONICS AND GEODYNAMICS

DOI: [10.46698/VNC.2020.92.72.004](https://doi.org/10.46698/VNC.2020.92.72.004)

Original paper

Geodynamics and geothermics of Pre-Caspian Depression and eastern segment of Caucasus region

V. B. Svalova 

Sergeev Institute of Environmental Geoscience, Russian Academy of Sciences,
13, building 2 Ulansky per., Moscow 119100, Russian Federation, e-mail: v-svalova@mail.ru;
Geophysical Institute, Vladikavkaz Scientific Centre, Russian Academy of Sciences, 93a
Markova Str., Vladikavkaz 362002, Russian Federation

Received: 20.09.2020, revised: 14.10.2020, accepted: 20.11.2020

Abstract: The relevance of the work is determined by the importance of assessing and predicting the oil and gas potential of deep sedimentary basins, in particular, deep horizons of structures that are not always accessible to deep drilling for prospecting and exploration purposes. **The aim and research methods.** Along with applied questions, the aim of the study is the fundamental questions of the theoretical geodynamics of the formation and evolution of sedimentary basins in connection with the rise of mantle diapirs based on the methods of mechanical and mathematical modeling. Pre-Caspian Depression and eastern segment of Caucasus region, including Caspian Sea, can be considered as regions of area of eastern part of Alpine belt, which is western part of Alpine-Himalayan belt disposed from Mediterranean sea to Pacific Ocean. Caspian sea crosses from North to South the series of structural zones of East European platform, Scythian-Turan platform and Alpine-Himalayan belt. Pre-Caspian Depression and South Caspian Depression are deep sedimentary basins with thickness of sedimentary cover more than 20 km which have high oil-gas potential and big industrial importance. Formation and evolution of sedimentary basin is the clue for oil-gas generation zones of sedimentary cover, that makes the problem of sedimentary basins geodynamics of great importance one. Geodynamics of relief is defined by deep mantle movements. Mechanical-mathematical model of the lithosphere dynamics gives possibility to link the basin parameters with mantle diaper upwelling. Analysis of geophysical fields gives opportunity to evaluate the asthenosphere upwelling, and elaborated self-conjugated thermo-gravimetric model makes this evaluation reliable and trustworthy one. Geodynamics and evolution history of geological structures determine magmatism, volcanism, seismicity, geothermics, geothermal manifestations, oil-gas potential, natural hazards of region, that is basement for monitoring system creation and construction on fundamental scientific base, forecast and prognosis of natural catastrophes and oil-gas potential researches. **The result** of this work is a quantitative assessment of the rise of the asthenosphere under the sedimentary basin using the example of the Pre-Caspian Depression.

Keywords: sedimentary basins, modeling, geothermy, geodynamics, gravimetry, Caspian depression, Caspian Sea, South Caspian depression, Caucasus region, seismotomography.

For citation: Svalova V. B. Geodynamics and geothermics of Pre-Caspian Depression and eastern segment of Caucasus region. *Geologiya i Geofizika Yuga Rossii = Geology and Geophysics of Russian South*. (in Russ.). 2020. 10 (4): 52 – 69. DOI: 10.46698/VNC.2020.92.72.004.

Acknowledgments: This work was supported by a grant from the Russian Science Foundation (project No. 19-47-02010, "Natural hazards and monitoring for research in Russia and India") and research topics (No. 0142-2014-0027 "Development of the theory and methods of studying the latest tectonics and modern geodynamics of platform and orogenic territories in relation to the assessment of their safety").

Введение Актуальность и цели исследований

Актуальность исследования формирования и сравнительной характеристики осадочных бассейнов определяется важностью оценки и прогноза нефтегазового потенциала глубоких осадочных структур, в частности, их глубоких горизонтов, не всегда доступных глубокому бурению в поисковых и разведочных целях. Наряду с прикладными вопросами целью исследования являются фундаментальные вопросы теоретической геодинамики формирования и эволюции осадочных бассейнов в связи с подъемом мантийных диапиров на основе методов механико-математического моделирования, а также сравнительная характеристика геолого-геофизических и геодинамических параметров важнейших нефтегазоносных бассейнов, какими являются Прикаспийская и Южно-Каспийская впадины.

Прикаспийская впадина и восточный сегмент Кавказского региона, включая Каспийское море, могут рассматриваться как регионы окрестности восточной части Альпийского пояса, который в свою очередь является западной частью Альпийско-Гималайского пояса, простирающегося от западной оконечности Средиземного моря до Тихоокеанского побережья.

Каспийское море пересекает с севера на юг серию широтных структурных зон юго-восточной окраины древней докембрийской Восточно-Европейской платфор-

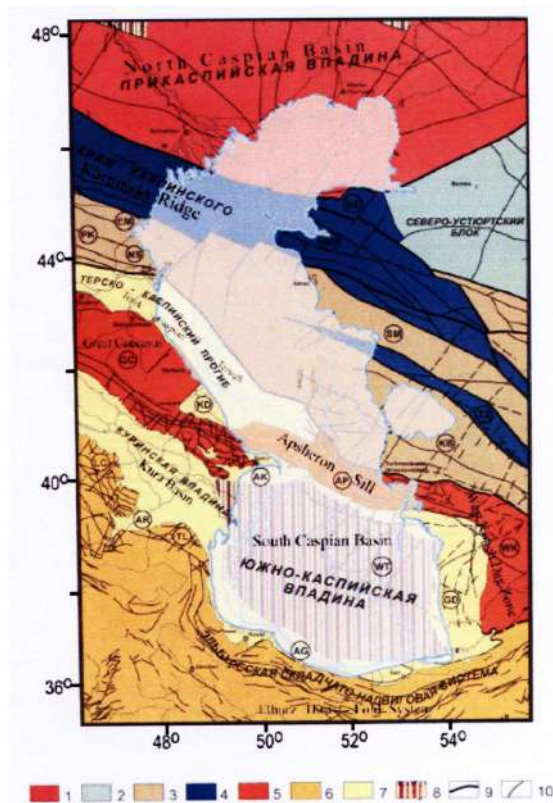


Рис. 1. Тектоническая карта Каспийского моря.

Фундамент платформенных областей (1-4):
1 – раннедокембрийский, 2 – байкальский,
3 – герцинский, 4 – раннекиммерийский.

Альпийские складчато-покровные системы (5, 6):
5 – Большой Кавказ и Копетдаг,
6 – Малый Кавказ, Талыш, Эльбурс, 7 –
передовые прогибы и впадины, 8 – впадины
с корой океанического типа, 9 – разрывные
нарушения на границах крупных структур,
10 – важные разрывы.

Fig. 1. Tectonic map of the Caspian Sea.

Foundation platform areas (1-4):

1 – Early Precambrian, 2 – Baikal, 3 –
Hercynian, 4 – Early Cimmerian.

Alpine fold-cover systems (5, 6):

5 – Greater Caucasus and Kopetdag, 6 – Lesser
Caucasus, Talysh, Elburs, 7 – foredeeps and
depressions, 8 – depressions with oceanic
crust, 9 – faults at the boundaries of large
structures, 10 – important breaks.

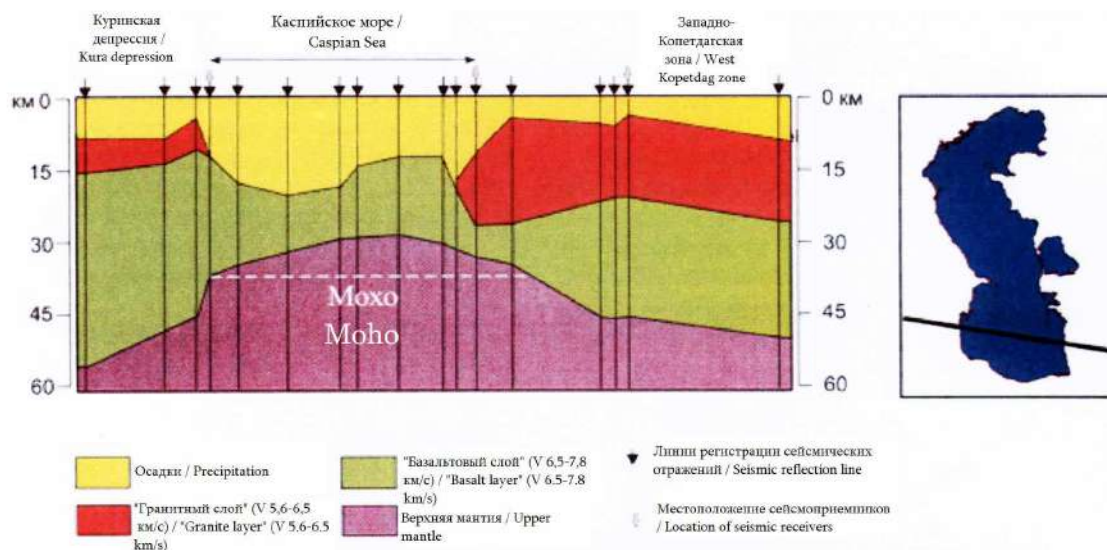


Рис. 2. Геофизический разрез литосферы Южно-Каспийской впадины [Jackson et al., 2002]. /

Fig. 2. Geophysical section of the lithosphere of the South Caspian Basin [Jackson et al., 2002].

мы, молодой эпигерцинской Скифско-Туранской платформы и современного Альпийско-Гималайского орогенного пояса (рис. 1) [Международная тектоническая карта..., 2003].

Прикаспийская и Южно-Каспийская впадины являются глубокими осадочными бассейнами с толщиной осадочного чехла более 20 км, обладающими высоким нефте-газовым потенциалом и большим народно-хозяйственным значением (рис. 2, 4).

В строении впадин наблюдаются общие черты, которые объясняются формированием осадочных бассейнов над поднимающимися мантийными диапирами [Свалова, 2014]. Различия в строении впадин обусловлены различиями в исторических и геолого-геофизических условиях формирования структур, различным временем образования и различным структурным обрамлением [Международная тектоническая карта..., 2003; Хаин, Ломизе, 2005; Хаин, 2005; Тектоника..., 1980; Земная кора..., 1982; Рогожин и др., 2015; Родников и др., 2003; Rodnikov et al., 2001; Грачев, 2000; Царегородцева, Курина, 2020]. И если для Южно-Каспийской впадины ключевым является ее нахождение на восточной оконечности Альпийского пояса, то для Прикаспийской впадины важным определяющим фактором строения и нефтегазоносности является принадлежность к древней платформе (рис. 3).

Так, пониженный тепловой поток Южно-Каспийской впадины находится в ряду понижающегося теплового поля отдельных морских впадин Средиземного моря с запада на восток, что отражает снижение геодинамической активности от центра активизации в районе Тирренского моря к периферии (Левантийская впадина, Черное и Каспийское моря). В то же время повышенный тепловой поток Прикаспийской впадины находится в ряду глубоких впадин на окраинах Русской платформы, включая Тимано-Печорскую и Североморскую впадины [The Global Heat Flow Database..., Моисеенко, Негров, 1993].

Глубинная гравитационная неустойчивость астеносферы проявляется в виде подъема крупномасштабного мантийного плюма, формирующего структуру Альпийского пояса в целом. На фоне общего подъема плюма поднимаются отдельные

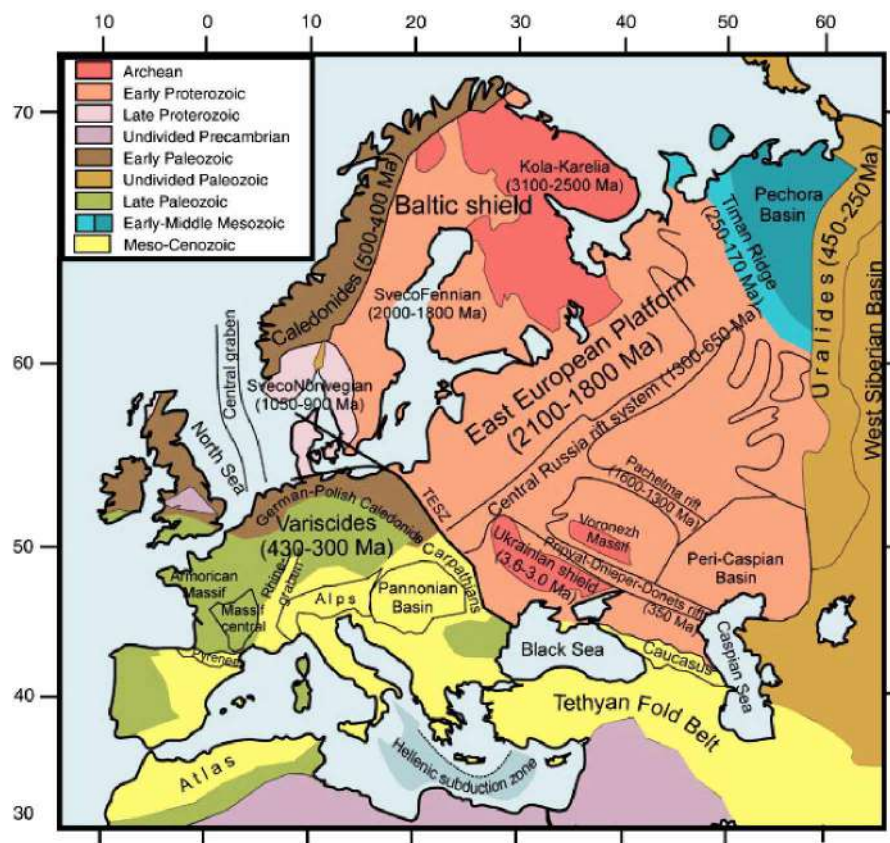


Рис. 3. Тектоническая карта Европы. [Artemieva et al., 2006]. /
Fig. 3. Tectonic map of Europe. [Artemieva et al., 2006].

диапиры, формирующие глубоководные впадины осадочных бассейнов. Проявление гравитационной неустойчивости имеет характерный масштаб расстояний между впадинами, определяемый толщами слоев осадочного чехла, консолидированной коры, мантийной литосферы и астеносферы, а также механическими свойствами формирующих пород, в частности, плотностью и эффективной вязкостью. Стадии подъема диапиров определяют тепловой поток структуры, а также магматизм, вулканизм и сейсмичность, т. е. геодинамическую активность или тектоно-магматическую активизацию.

Последовательная активизация и подъем диапиров в условиях коллизии литосферных плит и закрытия Альпийского палеоокеана могла формировать сначала Прикаспийскую впадину, затем Средне-Каспийскую, а затем Южно-Каспийскую впадину. Тепло от поднимающегося мантийного диапира могло достичь земной поверхности в Прикаспийской впадине, но еще не достичь в Южно-Каспийской. И это определяет различный тепловой фон в бассейнах, делая его более высоким в Прикаспии, чем в Южном Каспии.

Данные сейсмотомографии подтверждают наличие субдукции плиты Южно-Каспийской впадины под Эльбурс, что также подчеркивает схожесть формирования задуговых морей Альпийского пояса и Южного Каспия [Allen et al., 2002; Jackson et al., 2002; Priestley et al., 1993; Шарков, Свалова, 1989].

Геодинамика и история развития геологических структур определяют магматизм, вулканизм, сейсмичность, геотермические характеристики, геотермальную активность, нефтегазоносность, опасные природные процессы региона, что в свою

очередь является обоснованием создания системы комплексного экологического мониторинга на фундаментальной научной базе, прогноза и предупреждения природных бедствий и катастроф [Добрев и др., 2019], а также поиска полезных ископаемых, включая углеводороды [Гончаров и др., 2015; Милюков и др., 2015; Svalova et al., 2019, 2020; Рогожин и др., 2015; Уломов и др., 2007].

1. Тепловое поле Прикаспийской впадины

Общий региональный температурный фон Прикаспийской впадины увеличивается с севера на юг и с востока на запад. Геотермические исследования Прикаспийской впадины отражены в целом ряде работ [Аксенов и др., 1985; Бочкарева и др., 1973; Геофизические поля..., 1985; Гордиенко, Завгородняя, 1984; Свалова и др., 1993; Соловьев и др., 1991; Мухтаров, 2008; Максимов и др., 1990; Родкин, 2003].

Литолого-физические особенности разреза надсолевых отложений и тектонические неоднородности осадочного чехла, обусловленные мощной толщей соляных пород, определили обширный диапазон изменений величин геотермического градиента в верхних частях разреза (рис. 4, 5, 6. Таб. 1, 2). [Аксенов и др., 1985; Бочкарева и др., 1973; Гордиенко, Завгородняя, 1984; Мухтаров, 2008; Максимов и др., 1990].

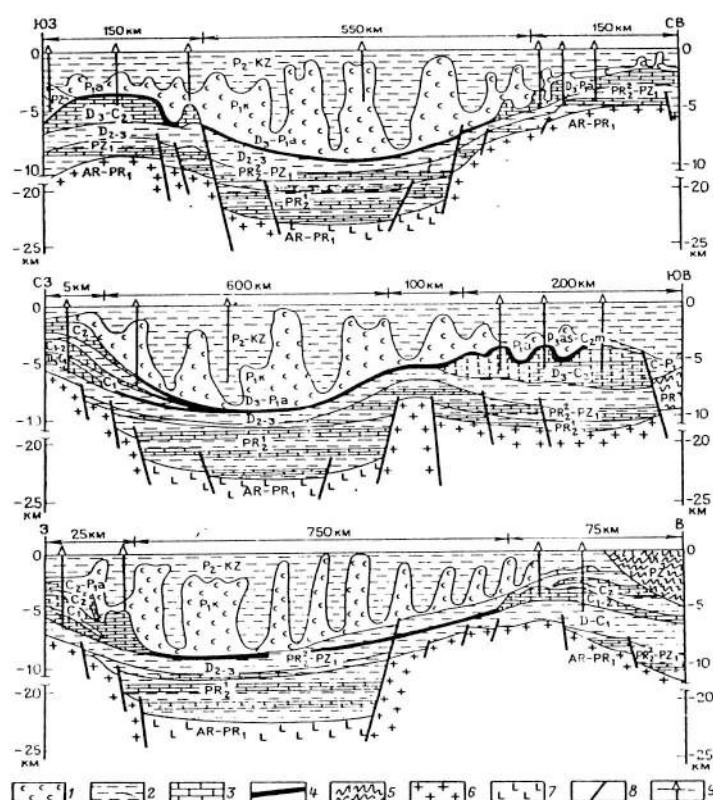


Рис. 4. Геологический разрез Прикаспийской впадины. [Максимов и др., 1990].

Породы: 1 – соль, 2 – терригенные, 3 – карбонаты, 4 – глины, 5 – конденсаты.

Комплексы: 6 – граниты, 7 – базальты. 8 – складки, 9 – глубокие скважины. /

Fig. 4. Geological section of the Caspian Basin. [Maksimov et al., 1990].

Rocks: 1 – salt, 2 – terrigenous, 3 – carbonates, 4 – clays, 5 – condensates.

Complexes: 6 – granites, 7 – basalts. 8 – folds, 9 – deep wells.

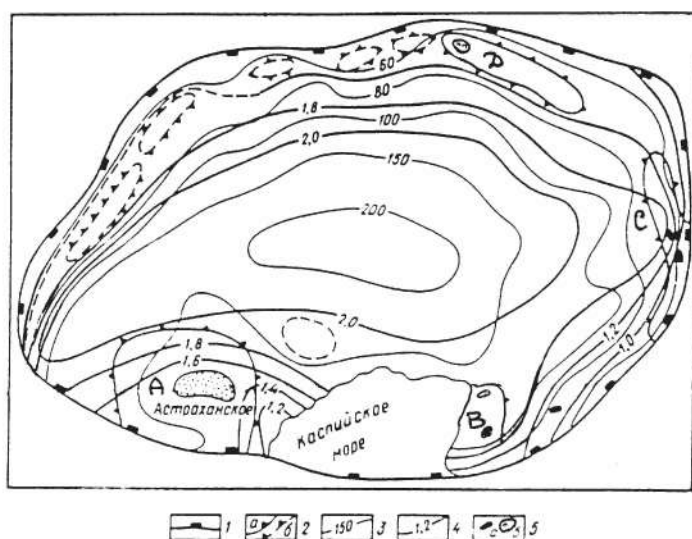


Рис. 5. Схема термобарических условий подсолевых месторождений

Прикаспийской впадины [Аксенов и др., 1985].

Границы: 1 – потенциальных нефтегазовых провинций, 2 – потенциальных нефтегазовых зон (а – известных, б – предполагаемых), 3 – геоизотермы на поверхности подсолевых месторождений, 4 – изолинии аномальных коэффициентов давления, 5 – нефтяные (а) и газовые (б) месторождения.

Основные нефтегазовые месторождения: А – Астраханское, В – Тенгиз, С – Кенкияк, Д – Карачаганак. /

Fig. 5. Scheme of thermobaric conditions of subsalt deposits of the Caspian basin. [Aksenov et al., 1985]. Boundaries: 1 – potential oil and gas provinces, 2 – potential oil and gas zones (a – known, b – assumed), 3 – geoisotherms on the surface of subsalt deposits, 4 – isolines of anomalous pressure coefficients, 5 – oil (a) and gas (b) deposits. Main oil and gas fields: А – Astrakhanskoye, В – Tengiz, С – Kenkiyak, D – Karachaganak.

В надсолевых отложениях геотермические градиенты изменяются от 1,5 до 3,5°C/100 м, причем повышенные значения ассоциированы с глинистыми отложениями палеогенового и верхнепермского возраста. В эвапоритах кунгурского яруса геотермические градиенты варьируются от 0,32 до 3°C/100 м. Десятикратный разброс в величинах градиентов обусловлен, по-видимому, положением пункта измерения по отношению к рельефу соляных масс. Все повышенные значения теплового потока получены в сводовых частях соляных куполов, где тепловой поток искажен явлениями, связанными с контрастной теплопроводностью. Помимо этого, сама точность оценок невелика. Так, для Аралсорской сверхглубокой скважины известны оценки теплового потока в 38, 49 и 59 мВт/м². Реальные значения для центральной части впадины лежат в интервале от 40 до 51 мВт/м². В восточной части, в районе Актюбинского Приуралья, неискаженное значение теплового потока составляет 40 мВт/м². В тектонически активных зонах Прикаспийской впадины, в пределах ее северо-западного обрамления, тепловой поток повышен и близок к 50 мВт/м². Вдоль южного борта протягивается широкая полоса высоких значений теплового потока – в среднем 55 мВт/м². Средние значения теплового потока в Прикаспийской впадине равны примерно 52 мВт/м².

Эти значения близки к средним значениям теплового потока для Печорской и Североморской впадин, т. е. крупнейшие синеклизы углов платформы на рифейском основании характеризуются специфическими величинами глубинного теплового потока, отличающими их от более древних структур Восточно-Европейской платформы (The Global Heat Flow Database of the International Heat Flow Commission. <http://www.heatflow.und.edu/>).

Таблица 1 / Table 1

Основные геотермические зоны Прикаспийской впадины /

Main geothermal zones of the cis-Caspian depression

Зона (рис. 5) / Zone (Fig. 5)	Т °С	
	на глубине 5 км / T °C at a depth of 5m	∇ T °C / 100 м
Кенкияк / Kenkiyak	76-90	1,7-2,0
Каспийская / Caspian	162-186	2,8-3,1
Тенгиз / Tengiz	160-167	2,8-3,2
Астраханская / Astrakhan	124-156	3,0-3,6

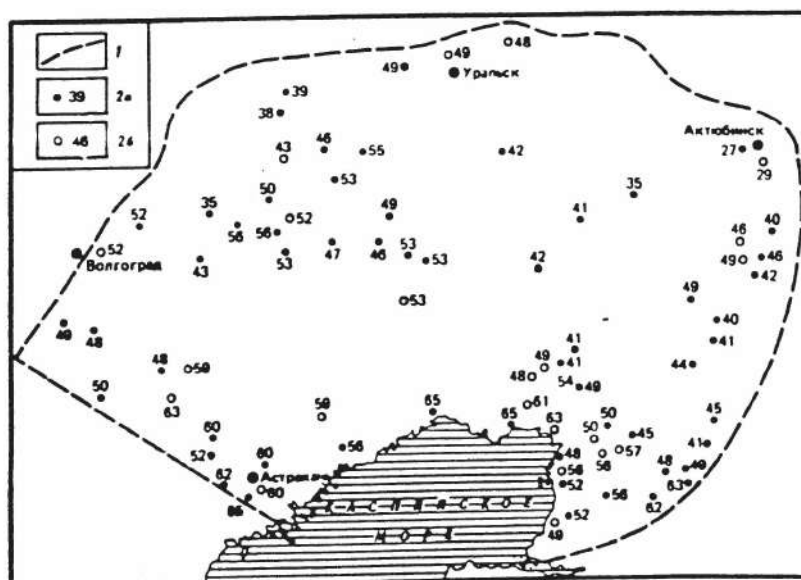


Рис. 6. Тепловой поток Прикаспийской впадины, мВт/м² [Аксенов и др., 1985].

1 – границы Прикаспийской впадины, 2 – точки определения теплового потока:

а – отдельные, б – групповые.

Fig. 6. Heat flow of the Pre-Caspian depression, mW/m² [Aksenov et al., 1985].

1 – boundaries of the Pre-Caspian depression, 2 – points of determination of the heat flow:

a – individual, b – group.

Таблица 2 / Table 2

Распределение температур на глубине 500-1000 м в структурах солевых куполов в восточной и западной частях Прикаспийской впадины. /
Distribution of temperatures at a depth of 500-1000 m in the structures of salt domes in the eastern and western parts of the cis-Caspian depression.

Глубина, м / Depth, m	Восток, Т °С / East, T °C	Запад, Т °С / West, T °C
500	21,2-31,9	23,4-28,4
750	27,0-42,1	37,3-43,0
1000	31,5-52,4	51,4-56,0

2. Гравитационное поле Прикаспийской впадины и ее обрамления

Гравитационное поле Прикаспийской впадины и ее обрамления существенно различно. В сопредельных районах Восточно-Европейской платформы оно характеризуется в целом относительно повышенными, а в Предуральском прогибе – пониженными значениями Dg .

На Восточно-Европейской платформе гравитационные аномалии обусловлены главным образом вещественным составом дорифейского фундамента.

Относительно пониженное гравитационное поле Предуральского краевого прогиба обусловлено большой мощностью (до 12 км и более) отложений осадочного чехла.

Поле силы тяжести Прикаспийской впадины в целом пониженное. В пределах Центральнопикаспийского прогиба в поле Dg фиксируются Аралсорский и Хобдинский региональные максимумы, обусловленные в основном мантийными выступами. Эти максимумы поля силы тяжести разделены аномалией поля Dg , которая характеризуется чередованием относительно повышенных и относительно пониженных значений гравитационного поля и прослеживается в южном направлении в пределы Актюбинско-Астраханской зоны поднятий вплоть до Каспийского моря. Вычисленная кривая гравитационного влияния рельефа поверхности подсолевых отложений по региональным сейсмическим профилям, пересекающим впадину в широтном и меридиональном направлениях, имеет минимальные значения в центральной, наиболее погруженной, части впадины и максимальные – в бортовых ее зонах. Однако в наблюдаемом гравитационном поле наиболее погруженной центральной части впадины отвечают региональные гравитационные максимумы, а ее бортовым зонам – региональные минимумы или пониженные значения гравитационного поля. Это значит, что региональные аномалии силы тяжести обусловлены более глубокими слоями земной коры и мантии [Аксенов и др., 1985; Грачев, 2000].

3. Методика исследования. Механико-математическая модель формирования и эволюции осадочного бассейна

Анализ всего комплекса геологических и геофизических данных дает основания связать формирование и эволюцию Прикаспийской впадины с подъемом мантийного диапира. [Svalova, 1992, 1993, 1997, 2002]. Разуплотненная мантия поднимается, формируя на дневной поверхности глубокую депрессию, постепенно заполняющуюся осадками. Термомеханическое моделирование показывает, что в зависимости от динамики подъема диапира на дневной поверхности возможно формирование сводового поднятия, сменяемого формированием глубокой депрессии. [Занемонец (Свалова) и др., 1974; Svalova, 1992, 1993, 1997, 2002; Свалова, Шарков, 1991, 1992, 2005; Шарков, Свалова, 1989, 1991; Sharkov, Svalova, 2011; Свалова, 2012, 2013, 2014; Гончаров, Свалова, 2013; Гончаров и др., 2015]. При достаточной мантийной активности возможна дальнейшая смена режима прогибания на режим формирования сводового поднятия и даже излияния базальтов. Общая картина движений может осложняться наличием фоновых горизонтальных движений. При аналитическом решении задачи удастся найти критические параметры, связывающие динамику мантийных движений с эволюцией рельефа поверхности [Svalova, 1992, 1993, 1997, 2002].

При исчерпании энергии мантийный диапир кристаллизуется, начиная с верхней части, наиболее высоко поднявшейся в сравнительно холодные слои литосферы. Уплотненная верхняя часть диапира может дать региональный гравитационный максимум, наблюдаемый в центре депрессии.

4. Термогравиметрическая модель осадочного бассейна

Для определения толщины литосферы Прикаспийской впадины и окружающих регионов предлагается использовать комплексную самосогласованную термогравиметрическую модель многослойной сплошной среды, описывающей в упрощенном виде строение осадочного чехла, консолидированной коры и верхней мантии геологической структуры.

Пусть геотермическое поле для установившегося процесса описывается стационарным уравнением теплопроводности с учетом только кондуктивного теплопереноса. На границах слоев выполняются условия непрерывности температур и тепловых потоков. Дневная поверхность характеризуется температурой 0 °С. Граница литосфера-астеносфера отождествляется с температурой плавления базальтов 1200 °С.

Итак:

$$\partial^2 T_i / \partial z^2 = - Q_i / k_i,$$

$$T^* = 0 \text{ } ^\circ\text{C}, \quad T^* = 1200 \text{ } ^\circ\text{C},$$

$$[T_i] = 0, \quad [k_i \partial T_i / \partial z] = 0,$$

где k_i – средняя теплопроводность i -того слоя, Q_i – теплогенерация, $T(x, z)$ – температура, x – горизонтальная координата, z – вертикальная координата.

Тогда для поверхностного теплового потока можно получить следующее выражение:

$$q^*(x) = - \frac{T_* + \sum_{i=2}^n h_i^2 Q_i / 2k_i + \sum_{i=2}^{n-1} h_i / k_i \sum_{j=i+1}^n h_j Q_j}{\sum_{i=2}^n h_i / k_i},$$

где $h_i(x) = z_i - z_{i-1}$ – толщина i -того слоя, n – число слоев, $z_1(x)$ – граница литосфера-астеносфера, $z_2(x)$ – граница Мохо, $z_3(x)$ – поверхность фундамента, $z_4(x)$ – дневная поверхность (для нерасчлененного осадочного чехла в упрощенной модели) (рис. 1).

Т. к. радиоактивные элементы сосредоточены в основном в коре, то теплогенерацию в мантийной литосфере можно считать равной нулю $Q_2=0$. Тогда для толщины мантийной литосферы получим выражение:

$$h_2(x) = - \frac{T_* + q^* \sum_{i=3}^n \frac{h_i}{k_i} + \sum_{i=3}^n \frac{h_i^2 Q_i}{2k_i} + \sum_{i=3}^{n-1} \frac{h_i}{k_i} \sum_{j=i+1}^n h_j Q_j}{1/k_2(q^* + \sum_{i=3}^n h_i Q_i)}$$

Таким образом, зная распределение поверхностного теплового потока $q^*(x)$, значения теплофизических характеристик слоев (теплопроводность и теплогенерация), а также глубину залегания поверхности фундамента и границы Мохо, можно определить глубину залегания астеносферного слоя как в центре депрессии, так и в сопряженных областях Восточно-Европейской платформы.

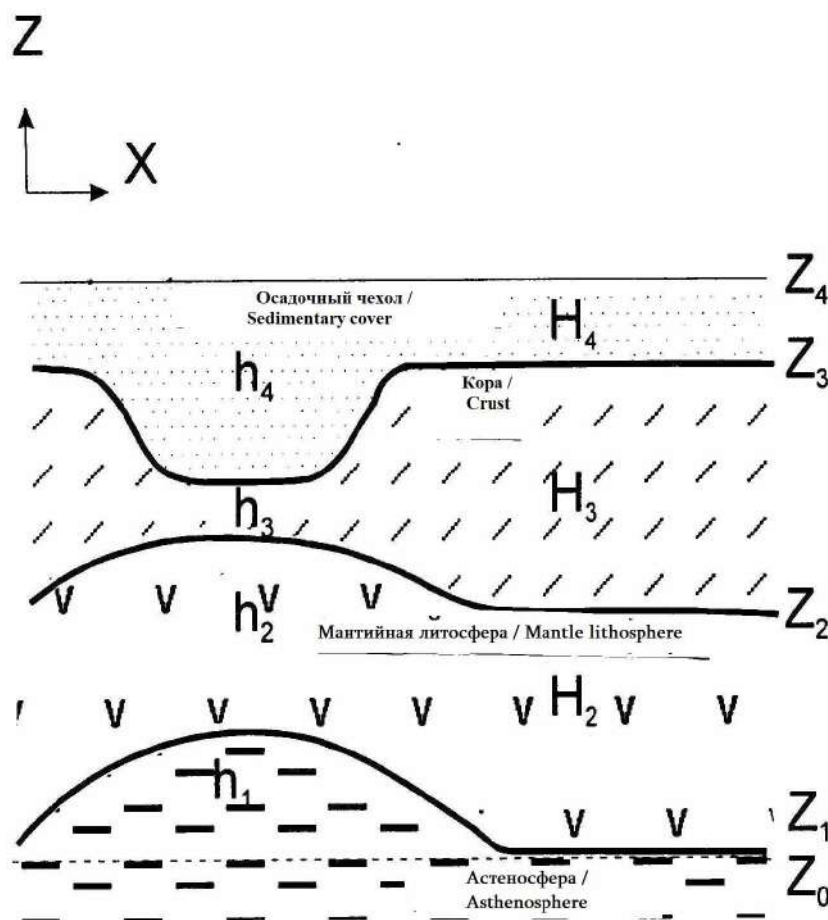


Рис. 7. Схематический разрез литосферы Прикаспийской впадины и прилегающей части Восточно-Европейской платформы.

Z_0 – уровень изостатической компенсации в астеносфере, Z_1 – граница литосфера-астеносфера, Z_2 – граница Мохо, Z_3 – поверхность фундамента, Z_4 – дневная поверхность.

Fig. 7. Schematic section of the lithosphere of the Caspian depression and the adjacent part East European Platform.

Z_0 – level of isostatic compensation in the asthenosphere, Z_1 – lithosphere-asthenosphere boundary, Z_2 – Moho boundary, Z_3 – basement surface, Z_4 – day surface.

Производя расчеты для характерных значений теплофизических характеристик и известных из геофизики границ, можно получить толщину литосферы в центре впадины порядка 110 км и для платформы около 180 км, т. е. подъем астеносферы под впадиной составляет около 70 км по сравнению с окружающими регионами. При расчетах использовались следующие характерные значения параметров: толщина осадочного чехла в центре впадины 24 км, на платформе 3 км. Толщина консолидированной коры 12 и 40 км, соответственно. Теплогенерация базальтов 0,5 мкВт/м³, гранитов 2 мкВт/м³, осадков 1 мкВт/м³. Коэффициент теплопроводности гранитов и базальтов 2,5 Вт/(м К), терригенных осадочных пород 1,7-2,1 Вт/(м К), соли – 5,4-6,6 Вт/(м К), т. е. среднее для осадочного чехла 3 Вт/(м К). $T = 1200^\circ\text{C} = 1473^\circ\text{K}$, $q^* = 50$ мВт/м² для впадины и $q^* = 40$ мВт/м² для платформы.

Рассмотрим теперь гравиметрическую модель литосферы. Будем считать Прикаспийскую впадину и Восточно-Европейскую платформу изостатически скомпенсированными структурами с уровнем компенсации в астеносфере. Тогда будем иметь следующую систему уравнений для впадины и платформы:

$$\begin{cases} \sum h_i \rho_i = \sum H_i \rho_i, \\ \sum h_i = \sum H_i. \end{cases}$$

Здесь ρ_i – плотности слоев. Первое уравнение характеризует равенство давлений на уровне изостатической компенсации для многослойной литосферы впадины (h_i) и платформы (H_i). Второе уравнение содержит предположение, что уровень изостатической компенсации для впадины и платформы совпадает. В частности, для упрощенной модели, состоящей из слоя астеносферы (h_1), мантийной литосферы (h_2, H_2), консолидированной коры (h_3, H_3) и осадочного чехла (h_4, H_4) можно получить величину выступа астеносферы под впадиной по отношению к уровню астеносферы под платформой h_1 и разницу толщин мантийной литосферы для впадины и платформы $H_2 - h_2$:

$$h_1 = \frac{(\rho_4 - \rho_2)(h_4 - H_4) + (\rho_3 - \rho_1)(h_3 - H_3)}{\rho_2 - \rho_1},$$

$$H_2 - h_2 = \frac{(\rho_4 - \rho_1)(h_4 - H_4) + (\rho_3 - \rho_1)(h_3 - H_3)}{\rho_2 - \rho_1}.$$

Для характерных значений плотности $\rho_4 = 2,3$ г/см³ (осадочный чехол), $\rho_3 = 2,7$ (гранит) – $2,9$ г/см³ (базальт), $\rho_2 = 3,3$ г/см³ (литосфера), $\rho_1 = 3,4$ г/см³ (астеносфера) и толщин слоев из предыдущей геотермической модели получаем $h_1 @ 70$ км, $H_2 - h_2 @ 60$ км. Т. е. величина астеносферного выступа под впадиной из гравиметрической модели близка к значению, полученному из геотермической модели, что говорит о корректности моделей. То же самое можно сказать об утолщении мантийной литосферы под платформой. Одни и те же величины определяются двумя независимыми методами, что повышает надежность результата. В то же время, только геотермическая модель дает абсолютные значения толщины литосферы, а гравиметрическая только относительные изменения. Обе модели допускают дальнейшее уточнение и детализацию, увеличение числа слоев, усложнение теплофизических и геофизических характеристик слоев, учет региональных гравитационных и геотермических аномалий.

Результаты исследования

Анализ геолого-геофизических данных показывает, что пониженный тепловой поток Южно-Каспийской впадины находится в ряду понижающегося теплового поля отдельных морских впадин Средиземного моря с запада на восток, что отражает снижение геодинамической активности от центра активизации в районе Тирренского моря к периферии (Левантйская впадина, Черное и Каспийское моря). В то же время повышенный тепловой поток Прикаспийской впадины находится в ряду глубоких впадин на окраинах Русской платформы, включая Тимано-Печорскую и Североморскую впадины. Последовательная активизация и подъем диапиров в условиях коллизии литосферных плит и закрытия Альпийского палеоокеана могла формировать сначала Прикаспийскую впадину, затем Средне-Каспийскую, а затем Южно-Каспийскую впадину. Тепло от поднимающегося мантийного диапира могло достичь земной поверхности в Прикаспийской впадине, но еще не достичь в Южно-Каспийской. И это определяет различный тепловой фон в бассейнах, делая его более высоким в Прикаспии, чем в Южном Каспии.

Данные сейсмотомографии подтверждают наличие субдукции плиты Южно-Каспийской впадины под Эльбурс, что также подчеркивает схожесть формирования задуговых морей Альпийского пояса и Южного Каспия.

В строении Прикаспийской и Южно-Каспийской впадин наблюдаются общие черты, которые объясняются формированием осадочных бассейнов над поднимающимися мантийными диапирами. Различия в строении впадин обусловлены различиями в исторических и геолого-геофизических условиях формирования структур, различным временем образования и различным структурным обрамлением. И если для Южно-Каспийской впадины ключевым является ее нахождение на восточной оконечности Альпийского пояса, то для Прикаспийской впадины важным определяющим фактором строения и нефтегазоносности является принадлежность к древней платформе.

Заключение

Разработана самосогласованная термогравиметрическая модель литосферы и астеносферы осадочного бассейна, позволяющая количественно оценить подъем астеносферного диапира под геологической структурой. Модель исследуется на примере геофизических полей и геологических характеристик Прикаспийской впадины. Разработанная модель допускает и предполагает дальнейшее уточнение и совершенствование. Результаты моделирования были подтверждены сейсмическими исследованиями [Gee, Zeyen, 1996] и результатами работ по сейсмотомографии [Artemieva et al., 2006; Koulakov et al., 2012].

Литература

1. Аксенов А. А., Гончаренко Б. Д., Калинин М. К. Нефтегазовый потенциал подсольных отложений. – М.: Наука, 1985. – 205 с.
2. Бочкарева В. А., Сыдыков Ж. С., Джангирьянц Д. А. Подземные воды Прикаспийской впадины и ее восточных обрамлений. – Алма-Ата: Наука, 1973. – 228 с.
3. Геофизические поля и строение земной коры Закавказья. / Отв. ред. Белоусов В. В., Балавадзе Б. К. – М.: Наука, 1985. – 174 с.
4. Гончаров М. А., Свалова В. Б. Мантийный диапиризм как причина формирования новообразованных впадин Средиземноморья и окружающих центробежно-вергентных складчато-покровных орогенов. // Материалы 45 Тектонического совещания «Геологическая история, возможные механизмы и проблемы формирования впадин с субокеанической и аномально тонкой корой в провинциях с континентальной литосферой». – М.: ГЕОС, 2013. – С. 54-58.
5. Гончаров М. А., Короновский Н. В., Свалова В. Б., Разницын Ю. Н. Вклад мантийного диапиризма в процесс формирования новообразованных впадин Средиземноморья и Карибского бассейна и окружающих центробежно-вергентных складчато-покровных орогенов. // Геотектоника. – 2015. – № 6. – С. 80-93.
6. Гордиенко В. В., Завгородняя О. В. Тепловой поток Прикаспийской впадины. // Геотермические исследования в Средней Азии и Казахстане. – М.: Наука, 1984. – С. 251-255.
7. Грачев А. Ф. Южно-Каспийская впадина. // Новейшая тектоника, геодинамика и сейсмичность Северной Евразии. – М.: Изд-во «Пробел», 2000. – С. 217-224.
8. Добрев Н. Б., Иванов П. Г., Свалова В. Б., Заалишвили В. Б., Дзеранов Б. В. Опасные экзогенные процессы в горных районах Северного Кавказа и Болгарии. // Грозненский естественнонаучный бюллетень. – 2019. – № 4 (18). Т. 4. – С. 5-14.
9. Занемонец (Свалова) В. Б., Котелкин В. Д., Мясников В. П. О динамике литосферных движений. // Изв. АН СССР. Физика Земли. – 1974. – № 4 – С. 43-54.

10. Земная кора и история развития Средиземного моря. / Отв. ред. Муратов МВ. – М.: Наука, 1982. – 208 с.
11. Максимов С. П., Дикенштейн Г. Н., Золотов А. Н., Капустин И. Н., Кирюхин Л. Г., Размышляев А. А. Геология нефти и газа Восточно-Европейской платформы. – М.: Недра, 1990. – 274 с.
12. Международная тектоническая карта Каспийского моря и его обрамления. Объяснительная записка. / Отв. ред. Е. В. Хаин и В. И. Богданов Н. А. – М.: Научный Мир, 2003. – 120 с.
13. Международная тектоническая карта Каспийского моря и его обрамления. Ред.: В. Е. Хаин, Н. А. Богданов. Институт литосферы окраинных и внутренних морей РАН, 2003.
14. Милюков В. К., Миронов А. П., Рогожин Е. А., Стеблов Г. М. Оценки скоростей современных движений Северного Кавказа по GPS наблюдениям. // Геотектоника. – 2015. – № 3. – С. 56-65.
15. Моисеенко У. И., Негров О. Б. Геотермические условия Северо-Кавказской сейсмоопасной зоны. // В кн.: Геотермия сейсмичных и асейсмичных зон. – М.: Наука, 1993. – С. 32-40.
16. Мухтаров А. Ш. Тепловой поток восточной части Кавказской зоны коллизии. // Сб. научных трудов «Тепловое поле Земли и методы его изучения». – М.: РГГРУ, 2008. – С. 155-160.
17. Рогожин Е. А., Горбатиков А. В., Степанова М. Ю., Овсяченко А. Н., Андреева Н. В., Харазова Ю. В. Структура и современная геодинамика мегантиклинория Большого Кавказа в свете новых данных о глубинном строении. // Геотектоника. – 2015. – № 2. – С. 36-49.
18. Родкин М. В. Флюидогеодинамическая модель литосферы Южного Каспия. // Геотектоника. – 2003. – № 1. – С. 43-53.
19. Родников А. Г., Сергеева Н. А., Забаринская Л. П., Родкин М. В. Особенности строения литосферы осадочных бассейнов окраинных и внутренних морей. // Геофизика XXI столетия: 2002 год. – М.: Научный Мир, 2003. – С. 125-135.
20. Свалова В. Б. Термомеханика литосферы, нефтегазоносность и решение обратной задачи геодинамики. // Мониторинг. Наука и технологии. – 2012. – № 3 (12). – С. 21-24.
21. Свалова В. Б. Термогравиметрическая модель осадочного бассейна. Пример Прикаспийской впадины. /Материалы 45 Тектонического совещания «Геологическая история, возможные механизмы и проблемы формирования впадин с субокеанической и аномально тонкой корой в провинциях с континентальной литосферой». – М.: ГЕОС, 2013. – С. 193-198.
22. Свалова В. Б. Механико-математическое моделирование формирования и эволюции геологических структур в связи с глубинным мантийным диапиризмом. // Мониторинг. Наука и технологии. – 2014. – № 3 (20). – С. 38-42.
23. Свалова В. Б., Шарков Е. В. Формирование и эволюция задуговых бассейнов Альпийского и Тихоокеанского поясов (сравнительный анализ). // Тихоокеанская геология. – 1991. – № 5. – С. 49-63.
24. Свалова В. Б., Шарков Е. В. Геодинамика Байкальской рифтовой зоны (петрологические и геомеханические аспекты). // Геология и геофизика. – 1992. – № 5. – С. 21-30.
25. Свалова В. Б., Шарков Е. В. Позднекайнозойская геодинамика Альпийского складчатого пояса в связи с формированием внутриконтинентальных морей (петролого-геомеханические аспекты). // Известия ВУЗов. Геология и разведка. – 2005. – № 1. – С. 3-11.
26. Свалова В. Б., Соловьев Б. А., Иванова Т. Д. Геодинамика и геотермия Прикаспийской впадины. // Геотермия сейсмичных и асейсмичных зон. – М.: Наука, 1993. – С. 119-132.
27. Соловьев Б. А., Свалова В. Б., Иванова Т. Д. Термомеханическая модель формирования и эволюции осадочного бассейна на примере Прикаспийской впадины. // Теоретиче-

ские и экспериментальные исследования геотермического режима акваторий. – М.: Наука, 1991. – С. 93-104.

28. Тектоника Средиземноморского пояса. / Отв. ред. Муратов М. В., Яншин А. Л. – М.: Наука, 1980. – 244 с.

29. Уломов В. И., Данилова Т. И., Медведева Н. С., Полякова Т. П., Шумилина Л. С. К оценке сейсмической опасности на Северном Кавказе. // Физика земли. – 2007. – № 7. – С. 31-45.

30. Хаин В. Е. Проблема происхождения и возраста Южно-Каспийской впадины и ее возможные решения. // Геотектоник. – 2005. – № 1. – С. 40-44.

31. Хаин В. Е., Ломизе М. Г. Геотектоника с основами геодинамики. – М.: КДУ, 2005. – 560 с.

32. Шарков Е. В., Свалова В. Б. Внутриконтинентальные моря как результат задугового спрединга при коллизии континентальных плит. // Доклады Академии наук СССР. – 1989. – Т. 308. № 3. – С. 685-688.

33. Шарков Е. В., Свалова В. Б. О возможности вовлечения континентальной литосферы в процесс субдукции при задуговом спрединге. // Изв. АН СССР, сер. геол. – 1991. – № 12. – С. 118-131.

34. Царегородцева Т. К., Курина Е. Е. Проблемы границ, происхождения и возраста Южно-Каспийской впадины. // Материалы совещания «Фундаментальные проблемы тектоники и геодинамики». Т. 2. – М.: ГЕОС, 2020. – С. 386-391.

35. Allen M. B., Jones S., Ismail-Zadeh A., Simmons M., Anderson L. Onset of subduction as the cause of rapid Pliocene-Quaternary subsidence in the South Caspian basin. // Geology. – 2002. – Vol. 30. No. 9. – pp. 775-778.

36. Artemieva I. M., Thybo H., Kaban M. K. Deep Europe today: geophysical synthesis of the upper mantle structure and lithospheric processes over 3.5 Ga. From: Gee DG, Stephenson RA (eds). // European Lithosphere Dynamics. Geological Society. – London, Memoirs. – 2006. Vol. 32. – pp. 11-41.

37. Gee D. G., Zeyen H. J. (editors). EUROPROBE 1996 – Lithosphere Dynamics: Origin and Evolution of Continents. // Uppsala University. – 1996. – 138 pp.

38. Jackson J., Priesley K., Allen M., Berberian M. Active tectonics of the South Caspian Basin. // Geoph. J. Int. – 2002. – Vol. 148. – pp. 214-245.

39. Koulakov I., Zabelina I., Amanatashvili I., Meskhia V. Nature of orogenesis and volcanism in the Caucasus region based on results of regional tomography. // Solid Earth. – 2012. – No. 3. – pp. 327-337.

40. Priestley K., Cipar J. J. Central Siberian, upper mantle structure and the structure of the Caspian basin. // Phillips Laboratory Environmental Research Paper. – 1993. – No. 1125. – pp. 86-92.

41. Rodnikov A. G., Sergeyeva N. A., and Zabarinskaya L. P. Deep structure of the Eurasia-Pacific transition zone. // Russian Journal of Earth Sciences. – 2001. – Vol. 3. No. 4. – pp. 293-310.

42. Sharkov E., Svalova V. Geological-geomechanical simulation of the Late Cenozoic geodynamics in the Alpine-Mediterranean mobile belt. // New Frontiers in Tectonic Research – General Problems, Sedimentary Basins and Island Arcs. INTECH, Croatia. – 2011. – pp. 18-38.

43. Svalova V. B. Mechanical-mathematical models of the formation and evolution of sedimentary basins. // Sciences de la Terre, Ser. Inf. – 1992. – No. 31. – pp. 201-208.

44. Svalova V. B. Mechanical-mathematical simulation of geological structures evolution. // Geoinformatics. – 1993. – Vol. 4 (3). – pp. 153-160.

45. Svalova V. B. Thermomechanical modeling of geological structures formation and evolution on the base of geological-geophysical data. // Proceedings of the Third Annual Conference of the International Association for Mathematical Geology IAMG'97, Barcelona, Spain. – 1997. – Part 2. – pp. 1049-1055.

46. Svalova V. Mechanical-mathematical modeling for the Earth's deep and surface structures interaction. // Proceedings of International Conference IAMG, Berlin. – 2002. – 5 p.

47. Svalova V. B., Zaalishvili V. B., Ganapathy G. P., Nikolaev A. V., Melkov D. A. Landslide risk in mountain areas. // *Geology of the South of Russia*. – 2019. – No. 9 (2). – pp. 109-127.

48. Svalova V. B., Zaalishvili V. B., Ganapathy G. P., Ivanov P. Engineering and Technical Methods for Landslide Risk Management and Reduction. // *Sustainable Development of Mountain territories*. – 2020. – T. 12. No. 1 (43). – pp. 162-170.

References

1. Aksenov A. A., Goncharenko B. D., Kalinko M. K. Oil and gas potential of subsalt deposits. Moscow, Nauka, 1985. 205 p. (In Russ.)

2. Bochkareva V. A., Sydykov Zh. S., Dzhangir'yants D. A. Groundwaters of the Caspian Basin and its eastern framing. Alma-Ata, Nauka, 1973. 228 p. (In Russ.)

3. Belousov V. V., Balavadze B. K. Geophysical fields and the structure of the earth's crust in Transcaucasia. Moscow, Nauka, 1985. 174 p. (In Russ.)

4. Goncharov M. A., Svalova V. B. Mantle diapirism as the cause of the formation of newly formed depressions in the Mediterranean and the surrounding centrifugal-vergent folded-coverorogens. In: *Proceedings of the 45th Tectonic Meeting "Geological history, possible mechanisms and problems of formation of depressions with suboceanic and anomalously thin crust in provinces with continental lithosphere"*. Moscow, GEOS, 2013. pp. 54-58. (In Russ.)

5. Goncharov M. A., Koronovskii N. V., Svalova V. B., Raznitsin Yu. N. Contribution of mantle diapirism to the formation of newly formed depressions in the Mediterranean and the Caribbean and the surrounding centrifugal-vergent folded-coverorogens. *Geotectonics*, 2015. No. 6. pp. 80-93. (In Russ.)

6. Gordienko V. V., Zavgorodnyaya O. V. Heat flow of the Caspian Basin. Geothermal research in Central Asia and Kazakhstan. Moscow, Nauka, 1984. pp. 251-255. (In Russ.)

7. Grachev A. F. South Caspian depression. The latest tectonics, geodynamics and seismicity of Northern Eurasia. Moscow, Publishing house "Probel", 2000. pp. 217-224. (In Russ.)

8. Dobrev N. B., Ivanov P. G., Svalova V. B., Zaalishvili V. B., Dzeranov B. V. Dangerous exogenous processes in the mountainous regions of the North Caucasus and Bulgaria. *Grozny Natural Science Bulletin*, 2019. No. 4 (18). Vol. 4. pp. 5-14. (In Russ.)

9. Zanemonets (Svalova) V. B., Kotelkin V. D., Myasnikov V. P. On the dynamics of lithospheric movements. *Izv. Academy of Sciences of the USSR. Physics of the Earth*, 1974. No. 4. pp. 43-54. (In Russ.)

10. Muratov M. V. Earth's crust and evolution of the Mediterranean Sea. Moscow, Nauka, 1982. 208 p. (In Russ.)

11. Maksimov S. P., Dikenshtein G. N., Zolotov A. N., Kapustin I. N., Kiryukhin L. G., Razmyshlyayev A. A. Oil and gas geology of the East European platform. Moscow, Nedra, 1990. 274 p. (In Russ.)

12. Khain E. V., Bogdanov V. I. International tectonic map of the Caspian Sea and its framing. Explanatory note. Moscow, Nauchnyi Mir, 2003. 120 p. (In Russ.)

13. Khain E. V., Bogdanov V. I. International tectonic map of the Caspian Sea and its framing. Institute of Lithosphere of Marginal and Inland Seas, Russian Academy of Sciences, 2003. (In Russ.)

14. Milyukov V. K., Mironov A. P., Rogozhin E. A., Steblov G. M. Estimates of the velocities of modern movements in the North Caucasus from GPS observations. *Geotectonics*, 2015. No. 3. pp. 56-65. (In Russ.)

15. Moiseenko U. I., Negrov O. B. Geothermal conditions of the North Caucasian seismic zone. In the book: *Geothermy of seismic and aseismic zones*. Moscow, Nauka, 1993. pp. 32-40. (In Russ.)

16. Mukhtarov A. Sh. Heat flow in the eastern part of the Caucasian collision zone. In: Proceedings "Thermal field of the Earth and methods of its study". Moscow. RGGRU, 2008. pp. 155-160. (In Russ.)
17. Rogozhin E. A., Gorbatiykov A. V., Stepanova M. Yu., Ovsyuchenko A. N., Andreeva N. V., Kharazova Yu. V. Structure and modern geodynamics of the Greater Caucasus meganticlinorium in the light of new data on the deep structure. *Geotectonics*, 2015. No. 2. pp. 36-49. (In Russ.)
18. Rodkin M. V. Fluidogeodynamic model of the lithosphere of the South Caspian. *Geotectonics*, 2003. No. 1. pp. 43-53. (In Russ.)
19. Rodnikov A. G., Sergeeva N. A., Zabarinskaya L. P., Rodkin M. V. Features of the structure of the lithosphere of sedimentary basins of marginal and inland seas. *Geophysics of the XXI century: 2002*. Moscow. Nauchnyi Mir, 2003. pp. 125-135. (In Russ.)
20. Svalova V. B. Thermomechanics of the lithosphere, oil and gas content and the solution of the inverse problem of geodynamics. *Monitoring. Science and technology*, 2012. No. 3 (12). pp. 21-24. (In Russ.)
21. Svalova V. B. Thermogravimetric model of a sedimentary basin. An example of the Caspian Basin. In: Proceedings of the 45th Tectonic Meeting "Geological history, possible mechanisms and problems of the formation of depressions with suboceanic and anomalously thin crust in provinces with continental lithosphere". Moscow. GEOS, 2013. pp. 193-198. (In Russ.)
22. Svalova V. B. Mechanical and mathematical modeling of the formation and evolution of geological structures in connection with deep mantle diapirism. *Monitoring. Science and technology*, 2014. No. 3 (20). pp. 38-42. (In Russ.)
23. Svalova V. B., Sharkov E. V. Formation and evolution of back-arc basins of the Alpine and Pacific belts (comparative analysis). *Pacific Geology*, 1991. No. 5. pp. 49-63. (In Russ.)
24. Svalova V. B., Sharkov E. V. Geodynamics of the Baikal rift zone (petrological and geomechanical aspects). *Geology and Geophysics*, 1992. No. 5. pp. 21-30. (In Russ.)
25. Svalova V. B., Sharkov E. V. Late Cenozoic geodynamics of the Alpine fold belt in connection with the formation of inland seas (petrological and geomechanical aspects). *Izvestiya VUZov. Geology and exploration*, 2005. No. 1. pp. 3-11. (In Russ.)
26. Svalova V. B., Solov'ev B. A., Ivanova T. D. Geodynamics and geothermics of the Caspian basin. *Geothermics of seismic and aseismic zones*. Moscow. Nauka, 1993. pp. 119-132. (In Russ.)
27. Solov'ev B. A., Svalova V. B., Ivanova T. D. Thermomechanical model of the formation and evolution of the sedimentary basin on the example of the Caspian Basin. *Theoretical and experimental studies of the geothermal regime of water areas*. Moscow. Nauka, 1991. pp. 93-104. (In Russ.)
28. Muratov M. V., Yanshin A. L. *Tectonics of the Mediterranean belt*. Moscow. Nauka, 1980. 244 p. (In Russ.)
29. Ulomov V. I., Danilova T. I., Medvedeva N. S., Polyakova T. P., Shumilina L. S. On the assessment of seismic hazard in the North Caucasus. *Izvestiya, Physics of the Solid Earth*, 2007. No. 7. pp. 31-45. (In Russ.)
30. Khain V. E. Problem of the origin and age of the South Caspian basin and its possible solutions. *Geotectonics*, 2005. No. 1. pp. 40-44. (In Russ.)
31. Khain V. E., Lomize M. G. *Geotectonics with the basics of geodynamics*. Moscow. KDU, 2005. 560 p. (In Russ.)
32. Sharkov E. V., Svalova V. B. Inland seas as a result of back-arc spreading during continental plate collisions. *Reports of the USSR Academy of Sciences*, 1989. Vol. 308. No. 3. pp. 685-688. (In Russ.)
33. Sharkov E. V., Svalova V. B. On the possibility of involving the continental lithosphere in the subduction process during back-arc spreading. *Izv. USSR Academy of Sciences, ser. Geol.*, 1991. No. 12. pp. 118-131. (In Russ.)

34. Tsaregorodtseva T. K., Kurina E. E. Problems of boundaries, origin and age of the South Caspian basin. In: Proceedings of the meeting "Fundamental problems of tectonics and geodynamics". Vol. 2. Moscow. GEOS, 2020. pp. 386-391. (In Russ.)
35. Allen M. B., Jones S., Ismail-Zadeh A., Simmons M., Anderson L. Onset of subduction as the cause of rapid Pliocene-Quaternary subsidence in the South Caspian basin. *Geology*, 2002. Vol. 30. No. 9. pp. 775-778.
36. Artemieva I. M., Thybo H., Kaban M. K. Deep Europe today: geophysical synthesis of the upper mantle structure and lithospheric processes over 3.5 Ga. From: Gee DG, Stephenson RA. *European Lithosphere Dynamics*. Geological Society. London. Memoirs, 2006. Vol. 32. pp. 11-41.
37. Gee D. G., Zeyen H. J. *EUROPROBE 1996 – Lithosphere Dynamics: Origin and Evolution of Continents*. Uppsala University, 1996. 138 pp.
38. Jackson J., Priesley K., Allen M., Berberian M. Active tectonics of the South Caspian Basin. *Geoph. J. Int.*, 2002. Vol. 148. pp. 214-245.
39. Koulakov I., Zabelina I., Amanatashvili I., Meskhia V. Nature of orogenesis and volcanism in the Caucasus region based on results of regional tomography. *Solid Earth*, 2012. No. 3. pp. 327-337.
40. Priestley K., Cipar J. J. Central Siberian, upper mantle structure and the structure of the Caspian basin. *Phillips Laboratory Environmental Research Paper*, 1993. No. 1125. pp. 86-92.
41. Rodnikov A. G., Sergeyeva N. A., and Zabarinskaya L. P. Deep structure of the Eurasia-Pacific transition zone. *Russian Journal of Earth Sciences*, 2001. Vol. 3. No. 4. pp. 293-310.
42. Sharkov E., Svalova V. Geological-geomechanical simulation of the Late Cenozoic geodynamics in the Alpine-Mediterranean mobile belt. *New Frontiers in Tectonic Research – General Problems, Sedimentary Basins and Island Arcs*. INTECH, Croatia, 2011. pp. 18-38.
43. Svalova V. B. Mechanical-mathematical models of the formation and evolution of sedimentary basins. *Sciences de la Terre, Ser. Inf.*, 1992. No. 31. pp. 201-208.
44. Svalova V. B. Mechanical-mathematical simulation of geological structures evolution. *Geoinformatics*, 1993. Vol. 4 (3). pp. 153-160.
45. Svalova V. B. Thermomechanical modeling of geological structures formation and evolution on the base of geological-geophysical data. In: Proceedings of the Third Annual Conference of the International Association for Mathematical Geology IAMG'97, Barcelona, Spain, 1997. Part 2. pp. 1049-1055.
46. Svalova V. Mechanical-mathematical modeling for the Earth's deep and surface structures interaction. In: Proceedings of International Conference IAMG, Berlin, 2002. 5 p.
47. Svalova V. B., Zaalishvili V. B., Ganapathy G. P., Nikolaev A. V., Melkov D. A. Landslide risk in mountain areas. *Geology of the South of Russia*, 2019. No. 9 (2). pp. 109-127.
48. Svalova V. B., Zaalishvili V. B., Ganapathy G. P., Ivanov P. Engineering and Technical Methods for Landslide Risk Management and Reduction. *Sustainable Development of Mountain territories*, 2020. Vol. 12. No. 1 (43). pp. 162-170.

ГЕОТЕКТНИКА И ГЕОДИНАМИКА

УДК 551.2.01-551.3.053

DOI: [10.46698/VNC.2020.87.26.005](https://doi.org/10.46698/VNC.2020.87.26.005)

Оригинальная статья

Влияние геодинамических процессов на геоэкологическое состояние высокогорных территорий

Х. О. Чотчаев , **О. Г. Бурдзиева** , **В. Б. Заалишвили** 

Геофизический институт Владикавказского научного центра Российской академии наук,
Россия, 362002, РСО-Алания, г. Владикавказ, ул. Маркова, 93а,
e-mail: chotho@yandex. ru

Статья поступила: 13.10.2020, после рецензирования: 30.10.2020, принята к публикации: 11.11.2020

Резюме: Научно обоснованный прогноз геоэкологической эволюции территорий на основе анализа причинно-следственной зависимости эндогенных и экзогенных процессов является **актуальной задачей** обеспечения безопасности рекреантов и планирования долгосрочного развития высокогорных туристско-рекреационных комплексов. **Цель исследований** – долгосрочный прогноз геоэкологической эволюции территории на основе факторов геодинамического развития и их признаков в геофизических полях. Для достижения поставленной цели решались **следующие задачи**: анализ современных представлений о влиянии эндогенных геодинамических процессов на изменения природной среды горных территорий и определение геодинамической концепции геоэкологической зависимости; методологическое обоснование проявлений геофизических полей-индикаторов тектономагматических процессов и выбор методов их исследования, выделение зон активных разломов и неотектонических проявлений. Использованы материалы исследований **методами** обменных волн землетрясений, гравимагнитометрии, микросейсмического зондирования, электротомографии, преломленных сейсмических волн, геолокации. В качестве **результатов** исследований делается вывод, что геоэкологические изменения вызваны неотектоникой трещинного типа в приледниковых зонах активных глубинных разломов из-за неравномерного воздымания отдельных участков территории при горообразовании, обуславливающего напряженно-деформированное состояние среды, концентрацию гравитационной энергии и последующее разрушение коренных пород приледниковых зон. Установлено, что механические, физические и геохимические поля, как неотъемлемые признаки-индикаторы проявлений и основа методологических обоснований исследований геодинамических процессов, оказывают долговременное влияние на породы на всех уровнях породообразования, формируя современную кору выветривания, и обуславливая интенсивное накопление четвертичных отложений. Определен режим среднестатистической геоэкологической эволюции территории, который определяется соотношением скоростей прироста гор и темпов денудации. Делается вывод, что комплекс сопутствующих признаков – индикаторов представляют собой абиотические факторы геоэкологической среды, особого биотопа, где зарождается определенная популяция биоценоза с эндемической зависимостью к этим условиям.

Ключевые слова: туристско-рекреационный комплекс, глубинные разломы, неотектоника, геодинамические процессы, геоэкология, геофизические методы, долгосрочный прогноз.

Для цитирования: Чотчаев Х. О., Бурдзиева О. Г., Заалишвили В. Б. Влияние геодинамических процессов на геоэкологическое состояние высокогорных территорий. *Геология и геофизика Юга России*. 2020. 10 (4): 70 – 100. DOI: 10.46698/VNC.2020.87.26.005.

DOI: [10.46698/VNC.2020.87.26.005](https://doi.org/10.46698/VNC.2020.87.26.005)

Original paper

Influence of geodynamic processes on the geoecological state of high mountain areas

Kh. O. Chotchaev^{id}, O. G. Burdzieva^{id}, V. B. Zaalishvili^{id}

Geophysical Institute, Vladikavkaz Scientific Centre, Russian Academy of Sciences, 93a
Markova Str., Vladikavkaz 362002, Russian Federation, e-mail: chotho@yandex. ru

Received: 13.10.2020, revised: 30.10.2020, accepted: 11.11.2020

Abstract: A scientifically established forecast of the geoecological evolution of areas based on the analysis of the causal relationship of endogenous and exogenous processes is a **relevant task** of ensuring the safety of vacationers and planning the long-term development of high-mountain tourist and recreational complexes. **Aim.** The aim of the research is a long-term forecast of the geoecological evolution of the area based on the factors of geodynamic development and their signs in geophysical fields. To achieve this goal, the following **tasks** were solved: analysis of modern ideas about the impact of endogenous geodynamic processes on changes in the natural environment of mountain areas and the definition of the geodynamic concept of geoecological dependence; methodological substantiation of the manifestations of geophysical fields-indicators of tectonomagmatic processes and the choice of methods for their study, identification of zones of active faults and neotectonic manifestations. **Methods.** Materials of research by methods of converted waves of earthquakes, gravimagnetometry, microseismic sounding, electro-tomography, refracted seismic waves, geolocation were used. **Results.** As a result of the research, it is concluded that geoecological changes are caused by fracture neotectonics in the periglacial zones of active deep faults due to uneven uplift of certain parts of the territory during mountain building, which causes the stress-strain state of the environment, the concentration of gravitational energy and the subsequent destruction of the bedrock of the periglacial zones. It has been determined that mechanical, physical and geochemical fields, as integral indicators of manifestations and the basis of methodological substantiation of studies of geodynamic processes, have a long-term effect on rocks at all levels of rockforming, creating the modern weathering crust, and causing an intensive accumulation of Quaternary sediments. The mode of average static geoecological evolution of the area is defined. It is determined by the ratio of the growth rates of mountains and the rates of denudation. One can draw a conclusion that the complex of accompanying signs-indicators is abiotic factors of geoecological environment, a special biotope, where a certain population of biocenosis with endemic dependence to these conditions arises.

Keywords: tourist and recreational complex, deep faults, neotectonics, geodynamic processes, geoecology, geophysical methods, long-term forecast.

Для цитирования: Chotchaev Kh. O., Burdzieva O. G., Zaalishvili V. B. Influence of geodynamic processes on the geoecological state of high mountain areas. *Geology and Geophysics of Russian South*. (in Russ.) 2020. 10 (4): 70 – 100. DOI: 10.46698/VNC.2020.87.26.005.

1. Современные представления о роли эндогенных геодинамических процессов в геоэкологической эволюции территорий альпийской складчатости

Влияние геодинамических процессов на геоэкологическое состояние террито-
рий рассматриваются в контексте геологических процессов, происходящих в гео-

сферах Земли и оказывающих влияние на геозкологическое состояние на границе литосферы и атмосферы.

Геодинамическая опасность (эндогенные и экзогенные процессы) – угроза, обусловленная геологическими процессами эндогенного и экзогенного характера, определяемая как вероятность проявления определенного события или комплекса событий на заданной территории с прогнозируемой силой и в течение заданного интервала времени.

При катастрофических проявлениях природных процессов (сильнейшие землетрясения 1906 г. в Сан-Франциско, Газлийское 1976 и 1984 гг. с магнитудами более 7 и Тяньшанское в 1976 г. магнитудой 8,2 (по шкале Рихтера), гигантский скальный обвал объемом в 2,2 млрд. куб. м с высоты более 5000 м в 1911 г. на Памире, перекрывший реку Бартанг и создавший на высоте 3255 м над уровнем моря Сарезское озеро площадью 70 x 3,3 кв. км, высокогорный оползень в китайской провинции Ганьсу с более 30 тыс. человеческих жертв, падение ледника с вершины горы Уаскарана в Перу с 60 тыс. человеческих жертв, катастрофический сход ледника Колка в Геналдонском ущелье в республике Северная Осетия-Алания, РФ – 114 человеческих жертв) меняется геозкологическая среда обитания, которая регрессирует, теряет многие виды органоминерального состава (абиотические факторы), из-за чего часть биоценоза погибает [Muir Wood, 1987], а часть пытается приспособливаться к новой геозкологической обстановке (давление, температура, влажность, физические и геохимические поля). При этом происходят локальные изменения ландшафта, которые не подлежат восстановлению или требуются десятилетия на реабилитацию, но в любом случае для микро- и фитоценоза это уже иная геозкологическая среда, адаптация к которой требует изменения в самой системе организации микроорганизмов и растений [Heads, 2018; Flavio, Ribeiros, 2011; Duvillard et al., 2015; Evans et al., 2009]. Так, например, землетрясение 1906 года в Сан-Франциско сопровождалось смещениями грунта вдоль разлома Сан-Андреас на расстояние до 6,0–8,5 м.

Кинематику в геодинамическом режиме планеты характеризуют литосферные плиты, а их динамику определяет энергетический баланс Земли. Несмотря на то, что внутреннее тепло Земли составляет всего около 0,02% против 99,8% поставляемого Солнцем Земле, вся солнечная энергия расходуется на прогрев первых десятков метров поверхностного слоя (далее солнечное тепло не успевает проникнуть из-за смены дня и ночи, при этом в ночное время Землей вся эта энергия излучается практически полностью обратно в космос [Аплонов, 2001; Хаин, Ломизе, 2005]. Это означает, что энергетический баланс создается самой Землей и источником для этого служит геотермия Земли (наименее верифицированный параметр, характеристики которого определяются на основе теоретических расчетов, математического моделирования физических явлений при сверхвысоких давлениях), однако самый важный из физических полей, так как распределение тепла в Земле прямо или косвенно определяет почти все проявления тектонической, магматической и вулканической активности.

Уточненная модель энергетического обеспечения эндогенной геодинамической активности внутриплитных структур, наблюдаемой на дневной поверхности (разрывные нарушения, вулканизм, сейсмичность, магматизм, рудообразование, термальные источники) [Астафьев, 2016], объясняет природу мелкофокусных очагов землетрясений и тектонические нарушения высоких порядков. Проявление эндо-

генных геодинамических процессов происходит исключительно за счет внутренней энергии Земли, восполняемой за счет теплотока конвектирующей мантии [Лобковский, Котелкин, 2000; Yuen et al., 2007] либо магмофлюидодинамической системой конвективных ячеек, представляющих собой ансамбли коромантийных плит. Системы пронизывают активные тектонические области и пояса, а также слой D и внешние слои жидкого ядра, обеспечивающие встречный погружению восходящий магматизм в поясах и областях субдукции-дайвинга и под формирующимися рифтами на континентах [Астафьев, 2007; Boyet et al., 2003].

Концепция двухъярусной тектоники плит [Лобковский, Котелкин, 2000; Астафьев, 2016] заключается в обдукции верхнего слоя континентальной коры при субдукции литосферных плит, т. е. одновременном протекании геодинамических обстановок субдукции и континентальной коллизии – первая для литосферных плит по классической схеме субдукции, вторая – для верхнего слоя континентальной плиты. По своей сути концепция двухъярусной тектоники представляет собой альтернативный контракционной гипотезе сценарий горообразования. Концепция объясняет причины утолщения земной коры, формирования горных хребтов и высоких плато, повышенный тепловой поток, миграцию сейсмоактивности, механизм отторжения и аккреции чужеродных блоков (террейнов).

Важнейший источник внутреннего тепла Земли – энергия глубинной гравитационной дифференциации, т. е. выделение тепла при перераспределении вещества Земли по плотности при его химических и фазовых превращениях. Выпадение железоникелевой составляющей жидкого ядра на границе с твердым ядром сопровождается выделением эквивалентного количества тепла [Сорохтин, Ушаков, 1993; Пушаровский, 2004]. Другим источником генерации тепла [Баркин, 1996] представляется вековой дрейф центра масс Земли, обусловленный движением плит и за счет барицентра с Луной, что создает эксцентриситет во внешнем ядре в процессе суточного вращения Земли, что способствует мощной генерации тепловой энергии, отвод которой осуществляется конвективным процессом в группировках коромантийных секторов, и это является важной составляющей силы, движущей литосферные плиты.

Активный тектогенез, дислоцированность, напряженность, трещинообразование, флюидопоступление, сейсмичность, магматизм, теплообмен, геохимические и геофизические поля – это все агенты, нарушающие структурные связи пород, повышающие пористость, способствующие интенсивному выветриванию и активизации эрозионных процессов, влияющие на эволюцию биоты, ограниченной определенным пространством [Trewick, 2017].

Исходя из принципа наименьшей энергии системы, геодинамический процесс следует рассматривать как единственное решение самой системой возникшего энергетического дисбаланса. С этой точки зрения человечество имеет какое-то представление о способах разрядки планетой избыточной своей энергии, но не знает, как проявляется в природе недостаток энергии, и бывает ли вообще недостаток энергии у Земли.

Эндогенная активность является причинным фактором активизации экзогенных процессов и одним из признаков этого является устойчивая приуроченность последних к тектоническим нарушениям и узлам разноранговых разрывных структур, очаговым зонам сейсмической и вулканоплутонической активности [Яроцкий, Чотчаев, 2016; 2019], отмечаемая всеми исследователями на всем пространстве развития Альпийской складчатости.

Состояние активности эндогенной геодинамики проявляется линейными глубинных тектонических нарушений кавказского простирания (контролирующие выходы минеральных источников), проявлениями землетрясений, складчатой дислоцированностью массива, трещиноватостью, геохимическими и геофизическими полями, сейсмичностью и особой индикационной характеристикой активного состояния – сейсмодислокациями.

Уровень воздействия на геоэкологическую среду эндогенных и экзогенных геодинамических процессов характеризуют широко развитые по площади различные генетические типы четвертичных образований, формирующие многочисленные очаги экзогенных опасных геологических процессов [Zaalishvili et al., 2019].

Рельеф местности, являясь структурой эндогенного проявления, отображает многие элементы тектонической деятельности, выраженные в геоморфологии.

Структура геоморфологии дает четкое представление о порядке взаимодействия между элементами поверхности и тектоническими процессами, а также об особенностях влияния климатических условий [Bull, 1991; Bull, McFadden, 1977; Keller, Pinter, 2002; Burbank, Anderson, 2001; Peters, Van Balen, 2007]. На основании этих работ делается вывод, что исчерпывающее изучение геоморфологических характеристик позволяет прогнозировать изменение ландшафта и эволюцию речной системы в результате тектонической деятельности.

Основными энергопроводящими каналами являются межблочные коровые тектонические нарушения, в процессе внедрения по которым магмафлюидная струя может проявиться по-разному: может внедриться интрузией, сместить блоки, создав условия для землетрясений, вырваться наверх и извергнуться вулканом.

Тектонический разлом связывает литосферу с атмосферой со всеми вытекающими последствиями транзита газов и растворенных элементов в восходящем и нисходящем режимах. В нисходящем потоке в литосферу поступает кислород за счет органических веществ биосферы. В восходящем потоке растворенные элементы и летучие компоненты вместе с ювенильными и мантийными водами перемещаются вверх за счет энергии конвективного течения мантийных струй.

По тектоническим нарушениям поднимаются к дневной поверхности растворимые и летучие элементы геохимических ореолов скрытых месторождений, пересекаемых разломом, которые могут содержать пары тяжелых и радиоактивных элементов.

Вся гамма наблюдаемых циклических знакопеременных и трендовых движений свидетельствует, что основным свойством геологической среды, особенно в разломных зонах, является нахождение ее в непрерывном движении. Движение выступает как форма существования геологической среды. В связи с этим роль и место современной геодинамики трудно переоценить в фундаментальной сфере наук о Земле, но еще более важна ее роль в решении практических задач по обеспечению безопасности объектов, связанных с освоением территорий с активной неотектоникой.

Активный разлом означает наличие связи с энергетическим очагом, т. е. проявления напряжений, деформаций, сейсмичности, присутствие изменяющихся по амплитуде импульсных электромагнитных полей, геохимических ореолов, на молекулярном уровне разрушающих геосреду и являющихся абиотическими факторами для фито- и микробиоценоз.

Различные авторы по-разному интерпретируют понятие «активный разлом». Так, к примеру, [Несмеянов, 2004] активность разлома оценивается по степени воздействия на инженерное сооружение, что следует понимать как прикладную интер-

претацию (хотя тектоническое воздействие может быть соизмеримо с гравитационной осадкой сооружения, что не означает отсутствие активности у разлома). Разные исследователи активность разлома оценивают по времени последнего проявления в интервале от голоцена [Allen, 1975] до порядка 400 тыс. лет [Никонов, 1994] или предлагают ограничить интервал активного проявления разлома сроком 100-150 тыс. лет [Трифонов, Караханян, 2008].

Активность разлома, по мнению автора, может выражаться не только динамическим воздействием, но и проявлениями аномальных механических, геофизических и гидрогеодеформационных полей, геохимическим воздействием на современную кору выветривания и ослаблением структурно-текстурных связей, потерей инженерных свойств пород, благоприятствующие интенсивному развитию экзогенных процессов, нарушению ландшафта, созданию очагов опасных экзогенных процессов, оголению склонов, уничтожению растительности.

По оценке новозеландских и южноамериканских экологов негативное воздействие тектонических нарушений на такую важную экосистему, как лесные массивы на территориях Чили и Новой Зеландии, может быть сопоставимо с влиянием пожаров [Veblen et al., 2016].

Продвижение вверх сингенетических и ювенильных вод и летучих компонентов из коровых пород и восходящих мантийных струй по тектоническим нарушениям и зонам трещиноватости происходит до определенного давления, удовлетворяющего уравнению (Менделеева-Клапейрона) состояния идеального газа $p=RT/V$ (p -давление, R -универсальная газовая постоянная, T -температура газа, V -объем газа), где они, смешиваясь с пластовыми водами, временно повышают уровень гидросферы. После разрядки эндогенной энергии происходит обратный отток и восстановление ювенильных вод уже иного минерального состава. Этим достигается их круговорот в системе гидросферы. В этот круговорот вовлекаются поверхностные загрязненные и руднично-скважинные техногенные воды гидросферы. Без эндогенной деятельности такой круговорот был бы невозможен и в этом одна из многих геодинамических экологических функций литосферы.

Подъем уровня подземных вод и изменение их минерального состава в период развития эндогенного воздействия, используемый как способ краткосрочного прогнозирования землетрясений, здесь рассматривается с позиции элементного соотношения минерального состава до и после события, позволяющее увязать энергетический очаг с определенным уровнем литосферы и верхов мантии.

Анализ комплекса динамических и физико-химических показателей, сопровождающих землетрясения как формы проявления геотектонической активности в виде физико-механических, геофизических, геохимических, гидрогеодинамических полей в зонах активных нарушений позволяет прогнозировать площади активизации экзогенных геологических процессов. При этом закономерная приуроченность к активным разломам очагов экзогенных опасных геологических процессов может быть использована для решения обратной задачи трассирования тектонических нарушений на закрытых участках и палеореконструкций землетрясений, связанных с определенными разломами по сохранившимся эрозионным накоплениям, что очень важно для прогнозирования эндогенного воздействия.

Прогноз землетрясения на Южном острове Новой Зеландии по Альпийскому глубинному разлому с 85% вероятностью магнитуды 8 единиц по шкале Рихтера должен будет активизировать оползень, площадь воздействия которого достигнет площади на более чем 30000 км², и переместит свыше 1,0 млрд. м³ грунта. Заили-

вание рек на площади более 125 км² может составить 3 м. [Robinson et al., 2013]. Воздействие такого масштаба экзогенного процесса на геоэкологическую среду будет иметь катастрофические последствия для всего острова и реабилитация его затянется на долгие годы.

Постледниковый этап активного геодинамического воздействия отчетливо проявляется на участках абляции ледников, где обнажаются активные глубинные разломы. В их пределах, в виде коротких разрывов трещинного типа, возникают нарушения, кулисообразно расположенные к глубинному разлому, и составляющие с ними единые линеаменты, ориентированные согласно орогену. Эти нарушения возникают не за счет землетрясений, а как остаточные деформации в периоды сейсмического затишья. Наблюдения в Швейцарских Альпах показали, что максимальной скорости подъема поверхности (1,6 мм/год), подвержены участки последними сброшенные ледяной панцирь [Persaud, Pfiffner, 2004].

Восстановлением изостатического равновесия за счет таяния ледников, из-за мелкомасштабности ледового фактора, вряд ли можно объяснить процесс подъема поверхности, но согласно принципу всеобщей связи событий исключать его из рассмотрения нельзя.

Другая модель предполагает подъем поверхности (рост гор) за счет активного тангенциального сжатия орогена в меридиональном направлении и его деформируемость, возникающая при сложных превращениях эндогенной энергии Земли в механические перемещения литосферных плит, в региональные глубинные тектонические разрывы земной коры и внутриблоковые нарушения, в катастрофические землетрясения.

В зоне Главного надвига были проведены специальные исследования методом визуальной дендроиндикации нетипичных фенотипических изменений за рядом ценообразующих пород деревьев – береза повисшая (*Betula pendula*), б. Литвинова (*B. litwinowii*) и б. Радде (*B. raddeana*); клён Траутфеттера (*Acer trautvetteri*), бук восточный (*Fagus orientalis*), сосна Коха (*Pinus kochiana*) и фотоиндикация последствий схода ледника Колка [Вьюхина, 2008; Вьюхина и др., 2013; Комжа, Заалишвили, 2014], показавшие присутствие в пределах зон тектонических нарушений аномальные воздействия геофизических полей, выразившиеся в превышении уровня абберации хромосомов (АХр) в клетках меристематической ткани эдификаторов.

Эндемики активных тектонических зон отмечаются в разных частях Земного шара. Приводятся данные, указывающие на обмен ихтиофауной между верховьями реки Рио-Токантинс и ее речными стоками Рио Парагвай, Рио-Парана, Рио-Сан-Франциско и Рио-Сингу. Все виды рыб, встречающиеся в этих притоках и в верховьях самой реки, относятся к родственным таксонам, а сами приведенные водоемы располагаются в активной тектонической зоне [Flavio, Ribeiros, 2011].

На основании исследований ареала распространения растения *Simplecia* делается вывод, что оно является эндемиком для активного тектонического нарушения Veihemo (Отахо) между Западной и Восточной провинциями [Heds, 2018].

Влияния землетрясений и извержений вулканов на экосистемы хорошо отслеживается на примере трансформаций деревьев, что может быть использовано для определения палеоземлетрясений [Muir Wood, 1987].

Маркирующими факторами проявления эндогенных геодинамических процессов в первую очередь являются землетрясения, глубинные разломы, зоны трещиноватости, сейсмодислокации, рост гор.

Индикаторами проявления геодинамических процессов являются аномальные отклонения характеристик механических геофизических, геохимических полей, изменчивый состав и содержания минеральных элементов в пластовых водах в пространственно-временной зависимости от эндогенного сейсмотектонического события, эманации радона.

Новейшими проявлениями глубинных геодинамических процессов являются сейсмотектонические разрывы – прямые признаки 8-10 балльных сейсмоударов, имевших место в голоцене. Часто по новейшим сейсмодислокациям смещаются современные формы рельефа (гребни, контрфорсы, балки, желоба и пр.).

Как правило, сейсмодислокации тяготеют к основным крупнейшим тектоническим разрывам. Максимальная их концентрация на территории Мамисонкого узла фиксируется по Тибскому и Нарскому разломам. По протяженности и ширине полосы развития Нарская зона новейших сейсмотектонических разрывов не имеет себе равных на всем Северном Кавказе.

Выводы

1. Существующие модели обеспечения и проявления энергетического баланса Земли разработаны на основе соответствия физическим и химическим законам, основополагающим постулатам геологических наук о геосферном формировании и вещественном содержании Земли, фактических данных о геотектонических, вулканических, магматических структурах, установленных на базе инструментальных наблюдений.

2. Структурами – индикаторами, регистрирующими характерные особенности воздействия глубинной геодинамической энергии на геоэкологическую среду, являются проявления геодинамической обстановки, горообразования, вулканизма, тектонических разрывных нарушений, землетрясений в виде локальных зон возникновения очагов, сейсмодислокаций, динамические воздействия в виде дислокаций, влияние физических полей и геохимических ореолов и, наконец, экзогенные последствия на геоэкологическую среду эндогенной геодинамической активности (практически полный комплекс генетических типов опасных экзогенных геологических процессов, сопровождающих тектоническую структуру). Типичные для горной территории экзогенные опасные геологические процессы: сели, лавины, оползни, сходы ледников, камнепады, обвалы, прорывы открытых и закрытых водонакопителей и пр.).

3. Одним из главных факторов широкого развития четвертичных отложений является длительное воздействие эндогенных процессов на коренные породы и формирование современной коры выветривания, прежде чем в естественном процессе горообразования эта кора не обнажится и не начнется экзогенный процесс ее разрушения и переотложений.

4. Индикаторами проявления активных геодинамических процессов служат аномальные характеристики динамических и геофизических, геохимических полей, изменчивый состав и содержание минеральных элементов в пластовых водах в пространственно-временной зависимости от эндогенного события, эманации радона.

5. Негативные геоэкологические последствия эндогенных процессов, в виде склоновых оползаний лесных массивов и растительного слоя высокогорья, приурочены к зонам активных тектонических нарушений, наносят ущерб экосистеме и ландшафту, активизируют дальнейшее развитие опасных экзогенных процессов в очагах.

2. Методологические основы исследования геодинамического развития. Физические поля как индикаторы геодинамических процессов

Методологической основой геоэкологии являются системный анализ и многофакторный (синергетический) подход к изучению окружающей среды в тесной связи с изучением атмосферы, гидросферы, биосферы и техносферы. Функциональная единица изучения геоэкологии – геоэкологические системы.

Весьма важными являются конечные выводы геоэкологических исследований, которые приводят к рациональному и щадящему подходу к окружающей среде и расширению медико-биологической информации. Это дает возможность при проведении соответствующего картирования определять места локализации тех или иных биотопов и коррелировать их с геодинамическими и геоэкологическими условиями.

В основу методологического обоснования проводимых исследований положены современные теоретические и эмпирические представления о геодинамических процессах, классификационных типах геодинамических процессов на территории, структурно-тектонических и литологических особенностях аккреционной структуры Южной микроплиты-террейна (рис. 1), комплексе свойственных физико-механических, геофизических и геохимических характеристик пород [Заалишвили, Чотчаев, 2016] (рис. 2). Как известно, геологический объект может быть осциллятором микросейсмических колебаний или служит фильтром определенных частот, может создавать естественные электрические поля за счет фильтрационных или диффузионно-адсорбционных процессов в нем, а его отклик на воздействие искусственными полями может служить оценочным параметром состояния объекта. Методологической основой исследований является также геоморфология, влияние которой на интенсивность формирования экзогенных процессов зависит от способности элемента рельефа разрушаться и условий накопления формами рельефа эрозийного материала [Ktern et al., 2012]. Важнейшей характеристикой геодинамических объектов является их напряженно-деформированное состояние, влияющее на физические параметры объекта, петрофизические свойства пород и уровень подземных вод (гидрогеодеформационное (ГГД) поле Земли).

Изменение уровня подземных вод в процессе подготовки землетрясения связывается не только с напряженно-деформированным состоянием среды, но и газогидродинамическим вытеснением глубинных и ювенильных вод восходящими конвективными течениями мантийного субстрата. Механизм такой зависимости требует специального исследования. Мониторинг изменения уровня подземных вод на территории позволяет делать краткосрочный прогноз землетрясений, контролировать событие, управлять рисками.

Следствием глубинной геодинамики являются термальные источники, минеральный состав которых несет информацию о литологических особенностях каналов транзита, о приуроченности энергетического очага эндогенного процесса к литосферным горизонтам или мантийной среде, для чего при наблюдениях за гидрогеодинамическим уровнем подземных вод необходимо отбирать пробы воды до и после события.

Методологически эффективным казался мониторинг сейсмодислокаций методом наблюдения за импульсами электромагнитных излучений, возникающих за счет дислокаций в напряженно-деформированных средах [Малышков, Джумабаев 1987].

Физические и химические основы межмолекулярных связей горных пород одновременно являются предвестниками протекающих нарушений этих связей, причиной которых является увеличение напряжений в породах и последующие упругие или неупругие, остаточные деформации. Исходя из основ формирования межмолекулярных связей, очевидно, что их индикатором являются электромагнитные поля, поскольку деформации кристаллической решетки вызывают изменение расстояний между атомами и квантово-механические флуктуации электронной плотности частиц (молекул, атомов).

Мгновенное распределение электрического заряда молекулы, которому отвечает мгновенный дипольный момент молекулы (или более высокого порядка мультипольный момент), индуцирует электрический мультипольный момент в другой молекуле. Лавинный эффект мгновенных мультипольных моментов создает энергию дисперсионного взаимодействия, которая проявляется в виде электромагнитных импульсов (ЭМИ) E -дисперсионного поля.

Стадии разрушения предшествует возникновение дислокаций, т. е. локальных смещений отдельных атомов кристаллической решетки. Дислокация способна распространяться в кристалле за счет меньшей дополнительной внешней энергии, чем требуется для образования дефекта при совершенной решетке.

Наиболее высокочастотная часть спектра ЭМИ соответствует возникновению таких дислокаций, множество которых приводит к образованию зон трещиноватости и тектонических нарушений [Чотчаев и др., 2018]. Каждый ранг тектонического проявления сопровождается определенным спектром электромагнитных импульсов, при этом низкочастотные импульсы характерны нарушениям относительно низких порядков и наоборот. Это, без всякого сомнения, относится к любому отдельно взятому комплексу, будь то магматический, метаморфический или осадочный, с той лишь разницей, что спектры деформаций каждого комплекса будут индивидуальными.

Для Кавказа характерна корреляционная зависимость периодов наибольшего числа землетрясений и событий с максимальными значениями магнитуд землетрясений с периодами солнечной активности в 11-тилетнем цикле Солнца, что требует дополнительных мер безопасности и ограничений в эти периоды в экстремальных видах туризма и повышенного внимания [Мазуров, 2019].

Наблюдается пространственная приуроченность гравитационных процессов к блокам высокой и очень высокой геодинамической активности, контролируемых крупными разломными зонами кавказского простираия и глубинными региональными разломами меридионального простираия.

В Центральной части Большого Кавказа активизация эндогенных геодинамических процессов четко увязывается с зонами пересечения крупных тектонических разломов субширотного направления с меридиональными разломами более низкого порядка. Одним из таких нарушений регионального масштаба является Сырхубарзондский разлом, пересекающий долину карового ледника Колка продольно. Разлом является северным ограничением реликтового рубца (сутуры) и продолжением на восток Главного Кавказского надвига. Разлом предположительно связан с камерой потухшего стратовулкана Казбек и продолжает служить каналом разгрузки поствулканических газов и флюидов остывающего массива, что служит одним из объяснений четырех исторически документированных случаев схода ледника Колка с интервалами от 30-70 и до 150 лет. Зона поражения последнего схода, произошедшего 20 сентября 2002 года, наиболее катастрофического и с многочисленными

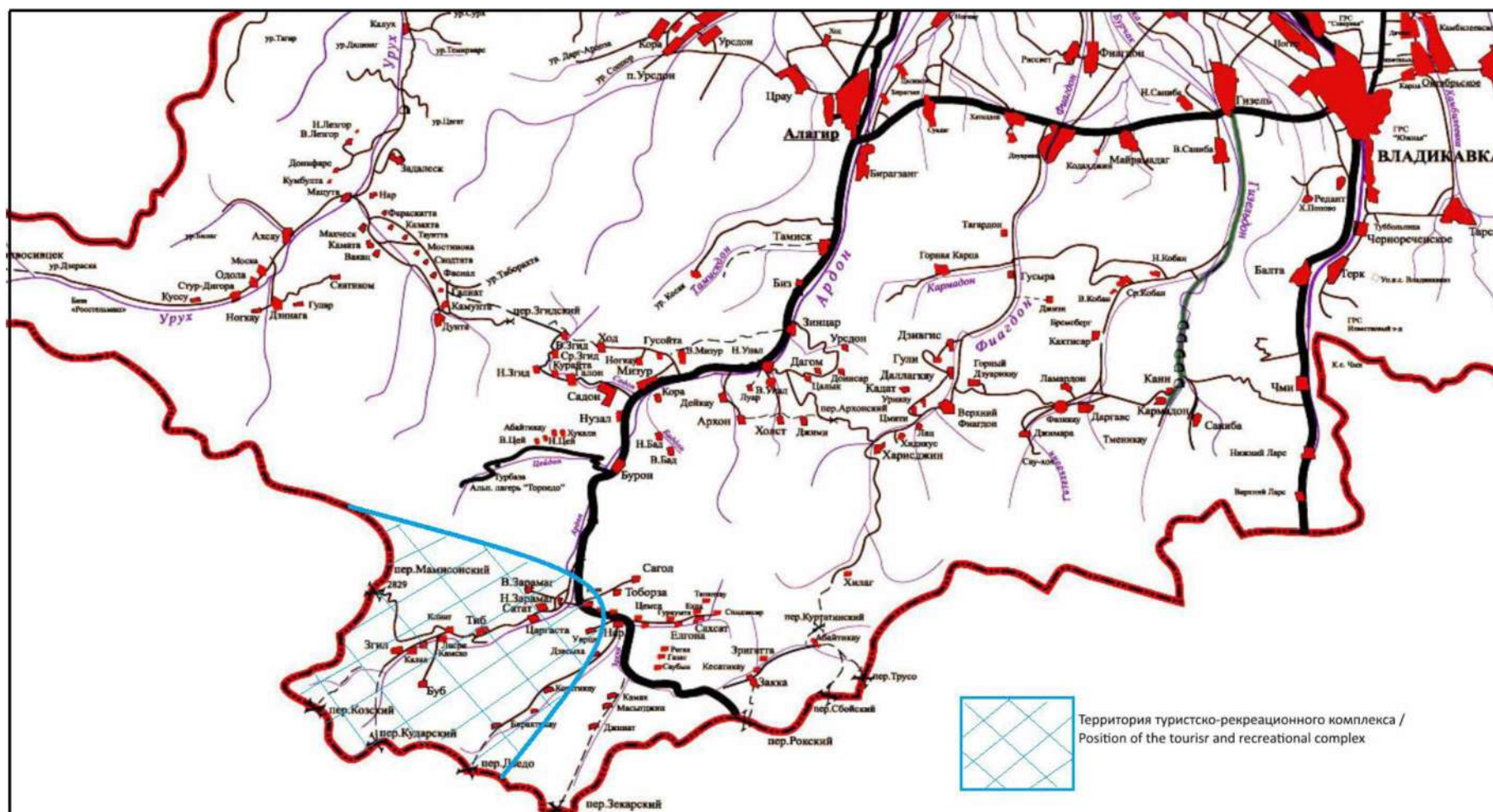


Рис. 1. Положение территории туристско-рекреационного комплекса «Мамисон» Республики Северная Осетия-Алания. /
Fig. 1. The position of the tourist and recreational complex "Mamison" of the Republic of North Ossetia-Alania.

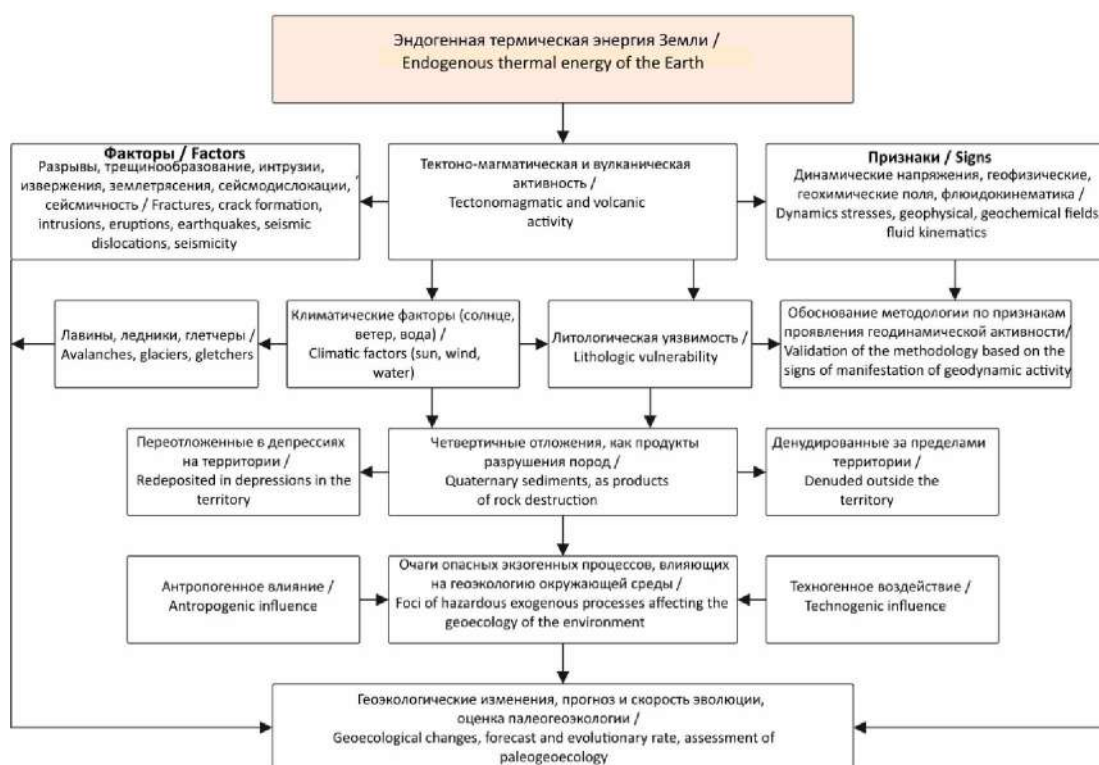


Рис. 2. Причинно-следственная зависимость активизации эндогенных и экзогенных опасных геологических процессов. Факторы и признаки геоэкологического воздействия на окружающую среду. /

Fig. 2. Causal dependence for activation of endogenous and exogenous dangerous geological processes. Factors and signs of geoeological impact on the environment (Chotchaev Kh. O., 2020).

ми людскими жертвами, оценивается как экологическая катастрофа [Norris, 1995; Zaalishvili, Melkov, 2014].

Методологическая эффективность контроля состояния геологического объекта, вовлеченного в экзогенный геодинамический процесс, определяется соответствием режима мониторинга и скорости изменения динамических и кинематических характеристик контролируемых объектов.

Важным методологическим фактором исследования и оценки состояния объектов опасных экзогенных геологических процессов является зависимость петрофизических свойств рыхлых покровных отложений от механических напряжений. Влияние петрофизических изменений на геофизические поля в зависимости от пространственных параметров объекта, магнитной восприимчивости материнских пород, плотности грунта, его влагонасыщенности и гранулометрического состава, контрастности по физическим характеристикам относительно подстилающих коренных пород. Эти свойства использованы при исследовании методами электро-томографических и сейсмических методов.

Важным методологическим фактором исследования и оценки состояния объектов опасных экзогенных геологических процессов является зависимость петрофизических свойств рыхлых покровных отложений от механических напряжений, влияние петрофизических изменений на геофизические поля в зависимости от пространственных параметров объекта, магнитной восприимчивости материнских пород, плотности грунта, его влагонасыщенности и гранулометрического состава,

контрастности по физическим характеристикам относительно подстилающих коренных пород. Степень изменения петрофизических свойств рыхлых отложений даже при незначительных вариациях напряженного состояния настолько значительна, что легко фиксируется геофизическими методами.

Обвально-осыпные и оползневые массивы характеризуются собственными частотами колебаний, отличающимися от микросейсмического фона подстилающих коренных пород. Если частотный спектр возникшего землетрясения будет иметь полосу частот собственных колебаний массива, в последнем возникнет эффект резонирования, опасный по достижению амплитуды более трехкратного уровня микросейсмического фона. Наблюдения важны за массивами, имеющими признаки статической неустойчивости типа трещин, поперечных продвижению оползня, следы тылового отрыва, увеличение высоты массива по фронту, поддвигание подошвенной части под массив.

При стабилизовавшемся уровне землепользования определяется срок, по истечении которого карты районирования четвертичных образований на территорию обновляются или корректируются. Режим мониторинга отдельных объектов предусматривает учет влияния единичного эндогенного геодинамического процесса на состояние объекта.

Методологическое решение достигается соответствием используемого комплекса геофизических полей физическим параметрам геологических сред. Так, при оценке характеристик каменных глетчеров и накоплений склонового генетического ряда (десерпций, дерупций, оползневые и осыпные накоплениями, солифлюкция) мощностью до 10-12 м, оперативным и эффективным оказался метод геолокационного зондирования, поскольку параметр диэлектрической проницаемости указанных геологических объектов резко контрастен относительно величины диэлектрической проницаемости коренных пород.

В случае больших мощностей объектов опасных экзогенных геологических процессов на аналогичных высокогорных площадях (Транскам, трасса газопровода, большой Хампаладагский и Луарский оползни) применялись электроразведочные методы вертикальных электрических зондирований (ВЭЗ) и дипольного электропрофилирования на двух разносах.

Алгоритмы распознавания опасных геодинамических и атмосферно-климатических процессов, воздействующих на геэкологическое состояние высокогорных ландшафтов, приведены на рисунке 3.

Перспективные направления методологического решения пространственно-временных интервалов эндогенных событий, их динамических и кинематических характеристик, масштабов и особенностей протекания рассматриваются как возможность создания верифицированной базы данных, используемых совместно с данными о геологических, гидрогеологических, сейсмотектонических и техногенных процессах для комплексного обобщения степени их воздействия на объекты строительства и элементы инфраструктурного обеспечения.

Методология обеспечения геологической информацией предусматривает учет результатов инженерных изысканий – региональные, площадные и локальные, так и специализированные исследования (геологические съемки масштаба 1:50000, 1:10000, материалы многолетнего мониторинга опасных геологических процессов на сопредельных территориях, а также отдельных поисково-разведочных работ на разные виды сырья). При этом важная роль отводится дешифрированию дистанционных материалов.



Рис. 3. Алгоритмы распознавания опасных геодинамических процессов, воздействующих на геоэкологическое состояние высокогорных ландшафтов. /

Fig. 3. Recognition algorithms of dangerous geodynamic processes affecting the geoeological state of high mountain landscapes (Chotchaev Kh. O., 2020).

Методологические разработки комплексной геолого-геофизической оценки влияния геодинамических процессов на объекты социально-экономической инфраструктуры и геоэкологического состояния окружающей среды обобщались и уточнялись на основе данных многолетних экспериментальных, прикладных и научных исследований.

Выводы

1. Важнейшей характеристикой геодинамических объектов является их напряженно-деформированное состояние, влияющее на физические параметры объекта, петрофизические свойства пород и уровень подземных вод (гидрогеодеформационное (ГГД) поле Земли).
2. Методологическим обоснованием исследований сейсмодислокационных зон и напряженно-деформированного состояния среды стал эффект электрострикции в виде импульсов электромагнитных излучений, возникающих за счет дислокаций в деформированных средах.
3. При оценке характеристик каменных глетчеров и накоплений склонового генетического ряда (десерпция, дерупция, оползневые и осыпные накоплениями, со-

лифлюкция) мощностью до 10-12 м, оперативным и эффективным является метод геолокационного зондирования за счет контрастности параметра диэлектрической проницаемости объектов и коренных пород.

4. Оползневые массивы характеризуются собственными частотами колебаний, отличающимися от микросейсмического фона подстилающих коренных пород. Если частотный спектр возникшего землетрясения будет иметь полосу частот собственных колебаний массива, в последнем возникнет эффект резонирования, опасный по достижению амплитуды более трехкратного уровня микросейсмического фона.

5. Методологические основы исследования отражают собой динамические, геофизические, геохимические характеристики геологической среды, определяя макропроявления геодинамических процессов, формируя алгоритмы причинно-следственного проявления геодинамических процессов и связанных с ними геоэкологических изменений окружающей среды через активизацию опасных экзогенных геологических процессов.

3. Состояние развития опасных экзогенных процессов

Роль четвертичных образований для биоценоза трудно переоценить, потому что они являются почвообразующими грунтами, на которых современные фитоценоз и микробиоценоз эволюционировали от мхов и микробов, а человек использует в качестве основной среды своего жизнеобеспечения. Рассматривая четвертичные образования с этой точки зрения, отдельные устойчивые массивы можно использовать в созидательных целях, но основная часть локальных образований требует периодической оценки динамических и кинематических изменений для прогнозирования развития опасных экзогенных процессов и предупреждения геоэкологических изменений.

Четвертичные образования характеризуют литологический состав материнских пород, уровень эндогенной геодинамической активности, развитие опасных экзогенных геологических процессов и геоэкологическое состояние территории. Их картографирование в масштабе 1:10000 и выделение очагов развития опасных геологических процессов позволяют прогнозировать сценарии негативного развития, своевременно разрабатывать структуры управления безопасностью упреждающие меры защиты и минимизации риска.

Основной состав четвертичных образований относится к позднему голоцену, верхнему неоплейстоцену-голоцену, верхнему и среднему неоплейстоцену и представлены ледниковыми накоплениями, пролювием крупных конусов и моренами.

Определяющее значение при формировании четвертичного покрова и рельефа территории на протяжении неоплейстоцена-голоцена имели процессы ледниковой экзарации и связанной с ней аккумуляции разновозрастных ледниковых, склоновых и аллювиально-пролювиальных накоплений в троговых долинах.

Механизмами возникновения генетических типов экзогенных геологических процессов, характерных для территории, являются высокая сейсмическая активность, расчлененный высокогорный рельеф и густая гидросеть. Сейсмичность нарушает устойчивость грунтов и слабосцементированных трещиноватых пород, расчлененный рельеф способствует гравитационному сползанию, а густая гидросеть служит накопителем и последующим путепроводом, когда в качестве движителя выступает аккумулярованная вода ливневых дождей или талые воды ледников.

Наиболее интенсивные геоэкологические изменения отмечаются за счет плоскостного смыва развитого повсеместно. Склоны в результате постоянного смыва дерна и почвы при крутизне всего 25-30° на отдельных участках полностью обнажены на высоту 120-150 м. Активно плоскостной смыв происходит во время весенних и осенних дождей и ливней, когда склоны менее защищены растительным покровом.

Формирование и взаимосвязь эрозионных опасных геологических процессов, и их влияние на геоэкологию высокогорных территорий представлено на рисунке 4.

Расположение территории экономического развития в зоне альпийской тектономагматической активизации Большого Кавказа определяет свойственные горноскладчатым областям сложные инженерно-геологические условия, вызванные разнообразием литологического состава пород, их интенсивной тектонической нарушенностью, активной неотектоникой и сейсмичностью, многообразием геоморфологических форм и широким развитием современных экзогенных геологических процессов. [Чотчаев и др., 2017; Бурдзиева и др., 2016].

Из экзогенных геологических процессов на территории распространены: выветривание, эрозионные, селевые и гравитационные (оползневые, обвальные), лавинные, солифлюкция, суффозия. Территория характеризуется большой степенью опасности развития экзогенных геологических процессов.

Выветривание. Особенно интенсивно выветриваются сланцы лейаса и породы флишевой формации. При физическом выветривании аргиллиты и мергели под влиянием переменного высыхания и увлажнения теряют монолитность, дезинтегрируясь до дресвы и мелкой щебенки. Песчаники, алевролиты и известняки распадаются на отдельные глыбы и куски. Этот вид опасного процесса широко развит по всей изучаемой площади, как на гребневых ее участках, так и на склонах, особенно проявлен по разрывным тектоническим нарушениям и зонам их влияния. Это основной источник обломочного материала для очагов формирования селей,

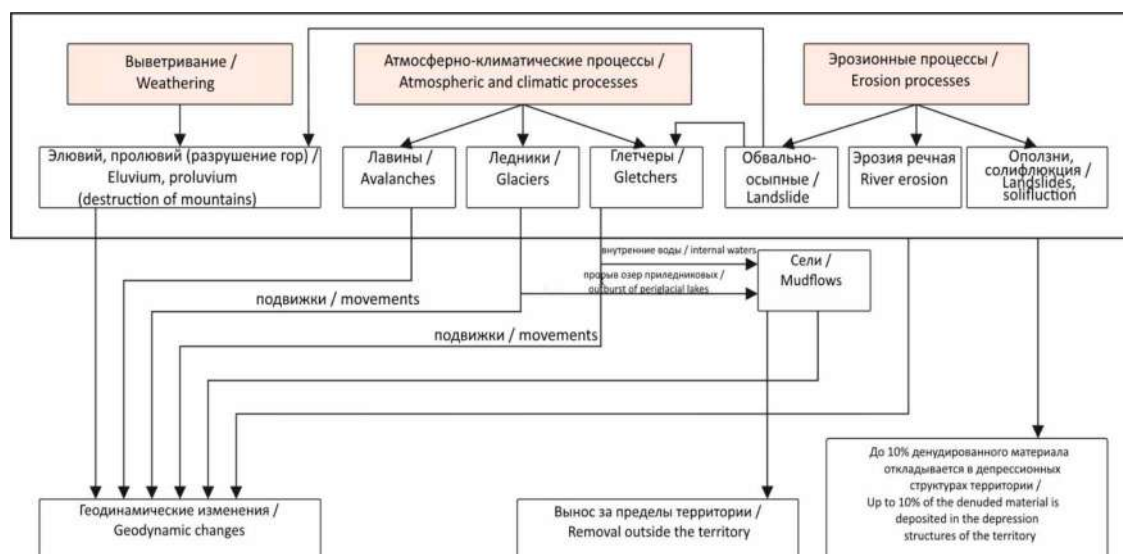


Рис. 4. Характерные природные опасные экзогенные геологические процессы воздействия на геоэкологическое состояние высокогорных территорий. /

Fig. 4. Typical natural hazardous exogenous geological processes of impact on the geoeological state of high mountain areas (Chotchaev Kh. O., 2020).

оползней и образования склоновых отложений разных генетических типов и элювиальных на гребневых и пригребневых частях территории.

Эрозионные процессы. Проявляются очень часто и наносят значительный ущерб объектам экономики и особенно линейным сооружениям. К эрозионным процессам относятся плоскостной смыв, овражная эрозия, боковая и донная эрозия рек. Активизация процессов эрозии в региональном масштабе обусловлена тем, что в настоящее время ороген Большого Кавказа захвачен тектоническим поднятием со скоростями от 2 до 14 мм/год.

На площади изучения отмечены все виды эрозионных процессов: плоскостной смыв, струйная эрозия, боковая эрозия и вертикальная (овражная).

Селевые потоки. Территория является одним из наиболее селеопасных районов Центрального Кавказа за счет расчлененного рельефа, современного оледенения, высокой сейсмичности, огромных запасов рыхлообломочного материала, высокой увлажненности, создающих благоприятные условия для селеобразования. Пораженность территории составляет около 50%, на границе категорий весьма опасных и опасных [Шеко, 1980]

Всего классифицировано 183 селевых очага всех генетических групп и морфологических типов с потенциалом разового выброса твердой массы в объеме до 100 тыс. м³, из них по руслам основных рек и по водотокам селевых очагов отмечено 45 участков оползневого и селевого потенциального перекрытия русел подпорно-заторного типа с образованием кратковременных водонакопителей (до 10-25 т. м³) и последующим их прорывом с мощным одномоментным ударным воздействием.

Количество селевых сходов в основных бассейнах рек Мамисондон и Зруг за период последних регулярных наблюдений с 2004 по 2014 гг. показывают устойчивый рост числа селей и их общего объема (рис. 5.).

Зависимость объема селей от их числа и рассматриваемого года (период 2004-2014 гг.) можно описать следующей формулой:

$$V=3,3 t+42 N-3,0. \quad (1)$$

где V – объем селя, в тыс. м³;

N – число селей в год;

t – время, год.

Обвально-осыпные процессы. Около 80% всей площади исследования перекрыта рыхлообломочными отложениями, значительная часть которых является продуктом именно обвально-осыпных процессов. Причинами обвалов в условиях резко расчлененного рельефа и наличие интенсивно дислоцированных пород являются:

активные геодинамические процессы, весьма характерные для территорий расположенных на стыках мегаплит;

явления накопленного сейсмического воздействия (природного и техногенного), когда эффект обрушения проявляется не от одного мощного сейсмоудара, а от множества слабых в течение длительного времени;

сейсмовоздействие – мощные сейсмоудары до 7-9 баллов, разрядка которых в горных условиях происходит в пригребневых и привершинных частях рельефа, приводящих к обрушению крупных блоков скальных и рыхлых пород;

механизм работы трещин бортового отпора, особенно эффективный в высокогорной зоне с резкими суточными перепадами температур. При этом главную роль

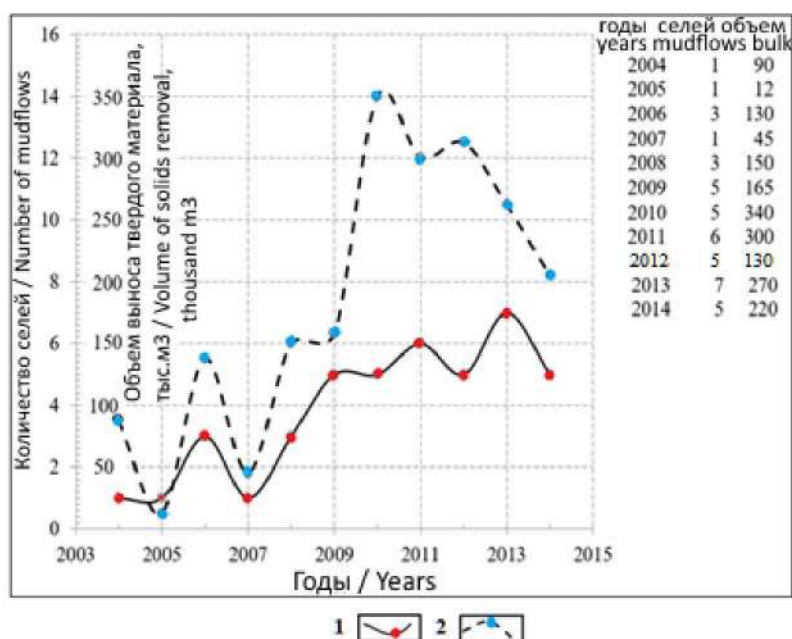


Рис. 5. Частота схода селей в бассейнах рек Мамисондон и Зруг по годам 2004-2014 (составил Чотчаев Х. О., 2020 г.).

1 – количество селей в году; 2 – объем (тыс. м³) выноса твердого материала. /

Fig. 5. Frequency of mudflows in the basins of the Mamisondon and Zrug rivers by years 2004-2014 (developed by Chotchaev Kh. O., 2020).

1 – the number of mudflows per year; 2 – volume (thousand m³) of solid material eluviation.

играют именно микротрещины, в которых воздействие замерзающей влаги особенно сильно.

На территории к обвалоопасным можно отнести любой крутосклонный (до 50-90) участок, но наиболее вероятными считаются участки развития мощных тектонических нарушений (Цейский надвиг и серия тектонических разломов южного склона – Северный и Нарский разломы, Тибский, Халацинский, Згильский, Саухохский), а также зоны развития новейших разрывных сейсмодислокаций, как проявления разрядки эндогенных тектономагматических напряжений.

Интенсивные обвально-осыпные процессы протекают в зонах концентрации тектонических нарушений, отчетливо проявляющихся в сейсмических и электрических полях (рис. 6.).

В зоне реликтового рубца и южного склона отдельные участки земной коры перемещаются относительно друг друга до 12-15 мм в год на фоне 2-3 мм/год в целом по Большому Кавказу. Что создает огромные напряжения и вызывает не только землетрясения, но и обвалы.

Оползни. Из более чем 200 изученных оползневых массивов 120 классифицируются как активные, наибольшее количество из которых приходится на бассейны рек Ардон, Заккадон, Мамисондон, Адайкомдон и Цейдон. Четко прослеживается связь оползневых накоплений с литологией коренных пород: наибольшее распространение они имеют в пределах песчано-глинистых отложений юры в бассейнах р. р. Бубудона, Ручатдона, Лагаткома. Максимального развития оползневые накопления достигают в бассейне Ручатдона, в долине Лагаткома и на водоразделе между ними. Преобладают консистентные оползни-потоки, в том числе слившиеся друг с другом из песчанисто-глинистых пород юры. Протяженность потоков

0,2-0,4-0,6 км и до 0,8 км. Оползни скольжения повсеместно имеют резко очерченные в рельефе оползневые цирки.

Ими поражены оба склона долин Мамихдона и Зруга с образованием участков потенциального подпруживания русла оползневыми накоплениями встречного характера, создавая условия для образования водонакопителей прорывного типа во время селевой активизации. Широко развиты оползневые накопления в средней части долины Гибитандона.

Лавины. Лавинную опасность территории характеризует среднестатистическое количество осадков по месяцам и высотам (табл. 1).

В условиях узких циркообразных долин, когда имеет место переброс снежной массы на другой борт, лавины представляют опасность людям, жилым комплексам, канатным дорогам, горнолыжным трассам. Высокогорный ландшафт Главного Кавказского хребта с типичным эрозионно-денудационным и ледниково-экзарационным рельефом с редколесьем, субальпийскими и альпийскими лугами на горнолесных бурых оподзоленных почвах с содержанием гумуса до 5-7% благоприятствует лавинному воздействию.

Всего на территории выделено 388 очагов лавин лоткового типа с потенциалом выброса 5 тыс. куб. м и выше, из которых 27 будут угрожать жилым комплексам. Как наиболее масштабные и опасные приводятся краткие характеристики 14 лавинных очагов, имеющие свои номера в кадастре лавинной службы. Потенциал выброса снежных масс некоторых может достигать 150 тыс. куб. м.

Установлена пространственная приуроченность экзогенных процессов к блокам высокой и очень высокой геодинамической активности, контролируемых крупными разломными зонами кавказского направления и региональными глубинными разломами меридионального направления. Активизация экзогенных процессов зафиксирована в зонах пересечения крупных тектонических шовных зон субширотного направления меридиональными разломами более низкого порядка. Дополнительно к прочим причинам проявления оползневых процессов имеет место широкое развитие боковой эрозии за счет действия паводков, периодически возникающих в результате интенсивного таяния ледников.

Восходящие движения увеличивают общую энергию рельефа, которая и так достаточно высока. Об этом свидетельствуют большая эрозионная расчлененность рельефа и очень большой перепад высот (глубина) до местных базисов эрозии. В высокогорных районах длина эрозионной сети составляет 2,5-3,4 км/км², а глубина местных базисов эрозии 1000-1500 м. В этих условиях водные потоки характеризуются большой скоростью (до 3 м/сек и более) и выполняют значительную эрозионную работу.

Отмечено, что наиболее интенсивно линейная эрозия развивается в обвальнотысячных, делювиально-гравитационных и оползневых отложениях, глинистых сланцах и аргиллитах Северной и Южной межгорных депрессий. Это проявляется в образовании многочисленных промоин и оврагов глубиной до 4 м и резком увеличении их роста.

Проведена оценка масштабов развития опасных экзогенных геологических процессов в сравнении с охватом площади сетью инженерных сооружений развлекательного назначения, включая четыре жилые деревни на 10000 тыс. мест ежедневного пребывания (Лисри, Зруг, Козыком-Згил и Земергон), которая составляет около 170 кв. км. Предусматривается строительство тоннеля, длиной 10,5 км, соединяющего деревню в долине р. Зруг с комплексом деревень долины р. Мамихдон.

Таблица 1. / Table 1.

Распределение среднего многолетнего (1986-1990 гг.) количества осадков (в мм) по месяцам и высотам (Кулаев И. Г., фонды «Сеосгеологоразведка» 1997 г.). / Distribution of the average long-term (1986-1990) precipitation amount (in mm) by months and heights (Kulaev I. G., “Seosgeologorazvedka” funds 1997)

Метеостанция / Weather station	Абс. высота (м) / Absolute height (m)	I	II	III	IV	V	VI	VII	VIII	IX	X	XI	XII	XI- III	IV- X	Год / Year
1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	16	17
Н. Зарамаг / Lower Zaramag	1730	31	32	39	59	86	77	68	60	63	53	40	33	175	466	641
Цей (1800 м) / Tsey (1800 m)	1910	20	54	50	122	107	136	107	96	101	45	49	22	195	714	909
Калак (2400 м) / Kalak (2400 m)	2020	42	42	51	76	119	103	93	76	85	68	51	42	228	620	848
Мамисонский перевал (2854 м) / Mamison Pass (2854 m)	2830	73	76	81	82	110	109	86	85	77	65	59	65	354	611	918

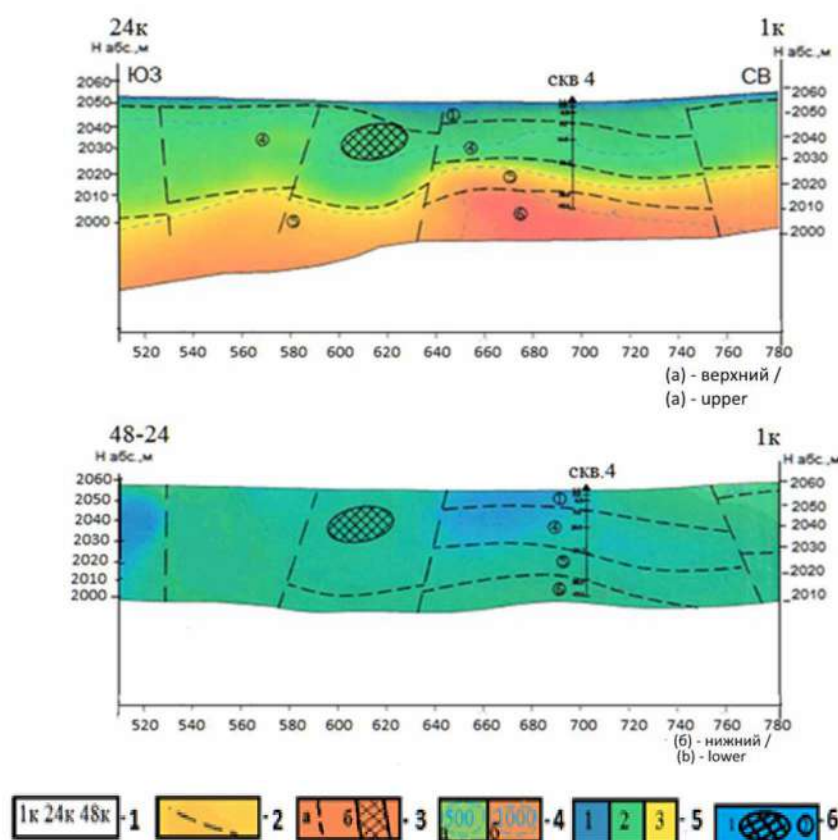


Рис. 6. Блоковое тектоническое дробление дочетвертичного основания и карстовое проявление по материалам методов сейсмопрофилирования (МПВ) (а) верхний и электротомографии (б) нижний. Участок Козыком-Згил, профиль 2-200-1. /

Fig. 6. Block tectonic crushing of the pre-Quaternary basement and karst manifestation based on the materials of seismic profiling methods (seismic-refraction method) (a) upper and electrotomography (b) lower. Kozykom-Zgil section, profile 2-200-1 (drawing and interpretation by Kh. O. Chotchaev, 2020).

Всю площадь, включающая 6 спортивно-развлекательных центра, планируется связать железной дорогой и окутать канатными дорогами, на всех центрах сооружаются горнолыжные трассы.

Охваченность территории очагами опасных экзогенных геологических процессов следующая: 80% указанной площади перекрыта рыхлообломочными отложениями обвально-осыпного типа с поражаемостью 30% всей территории. Подверженность территории селевому воздействию достигает 50%. По объему селевых разовых выносов все бассейны распределены на четыре группы: мощные с единовременным выбросом более 100000 м³ твердого материала; средние – от 10000 до 100000 м³; слабые – от 1000 до 10000 м³; микросели (склоновые) – менее 1000 м³.

Наиболее распространены и активны сели в области высокогорного рельефа в зоне Бокового и Главного хребтов, где сосредоточено около 50% всех селевых очагов.

Площадь, занятая ледниками, активными каменными глетчерами и древними каменными глетчерами составляет 19 кв. км или 13% всей территории. В количественном выражении это 36 ледников, 46 активных каменных глетчеров и 34 древних каменных глетчера, 39 озер ледниковой природы.

Ледники, каменные глетчеры и приледниковые озера. Площадь, занятая ледниками, активными каменными глетчерами и древними каменными глетчерами составляет 19 кв. км или 13% всей территории. В количественном выражении это 36 ледников, 46 активных каменных глетчера и 34 древних каменных глетчера, 39 озер ледниковой природы. Ледниковые подвижки крайне опасны для биоценоза и разрушительны для геоэкологии.

В условиях глобального потепления и отступания ледников на обнаженных приледниковых площадях вдоль основного нарушения кулисообразно ему развивается трещинная тектоника. Такого рода активность может угрожать сходом ледника или активного глетчера. Подвижка ледника в условиях геоморфологии Южной микроплиты вызовет вспахивание долин, сползание со склонов и перемещение глыбового материала, большой объем массопереноса, негативное преобразование ландшафта. Последствия, при этом, для геоэкологии будут сопоставимы с последствиями схода ледника Колка в Геналдонском ущелье 20 сентября 2002 г.

Выводы

1. Масштабы распространения и разнообразие генетических типов четвертичных отложений, характеризуют неустойчивый к физико-механическим нагрузкам литологический состав пород, дифференцированную геоморфологию территории, высокую активность эндогенных (обвалы, сейсмодислокации) и экзогенных (эрозионные аквальные, гляциальные, мерзлотные) геологических процессов. Рыхлообломочный чехол занимает около 70% всей рассматриваемой территории, в ряде мест достигая мощностей до 100 м.

2. Определяющее значение при формировании четвертичного покрова и рельефа территории на протяжении неоплейстоцена-голоцена имели процессы ледниковой экзарации и, связанной с ней аккумуляции разновозрастных ледниковых, склоновых и аллювиально-пролювиальных накоплений, сохранившихся во вложенных друг в друга троговых долинах.

3. Комплексное воздействие эндогенных и экзогенных геодинамических процессов на геоэкологическое состояние территории выражается в широком развитии

четвертичного покрова и многочисленных очагов различных генетических типов опасных экзогенных геологических процессов.

4. Высокая лавинная опасность территории определяется большим количеством лавинных очагов и их непредсказуемостью.

5. Неотектоническая активность в приледниковых зонах в виде кулисообразных трещин сходом ледника или активного глетчера.

4. Результаты исследований и их обсуждение

Пространственные и физические характеристики четвертичных образований, участки их локализации в массивы опасных геологических процессов и развитие тектонических нарушений под их покровами, прослеженные геофизическими методами сейсмического профилирования и электротомографии, вынесены на схемы районирования по степени опасности геологических процессов участков территории, где планируется строительство деревень и инженерной инфраструктуры.

Ниже приводятся схемы районирования двух объектов (участков Земегон и Зарамаг) с элементами тектоники и кратким описанием особенностей. На схемах районирования голубыми линиями показаны канатные дороги, вдоль части из которых (по возможности безопасного маневрирования с геофизическими установками) проведены геофизические исследования.

Поскольку в работе концептуальным является зависимость активизации экзогенных геологических процессов от тектономагматического проявления эндогенной геодинамической активности, выраженной на границе литосфера-атмосфера тектоническими нарушениями различных рангов и дислокациями, на схемы дополнительно вынесены региональные нарушения (Главный, Саухохский, Адайком-Казбекский).

Участок Земегон (рис. 7.). Участок характеризуется обвальными, обвально-осыпными и широко развитыми на всей южной половине площади оползневыми процессами. Для северной половины площади характерно развитие плоскостного смыва, концентрированного по обоим бортам реки Земегон и ее правого притока, создающего оползневые массивы в особенности на левом борту р. Земегон, угрожающие временной запрудой водотока. Основной материал пролювий крупных конусов выноса боковых притоков, состав щебенисто-дресвянный с суглинистым заполнителем. К югу от Саухохского разлома выделяются большие скопления обвальных, обвально-осыпных, каменных и каменно-землянных глетчеров.

В пределах площади, изученной геофизическими методами, тектоника под покровом четвертичных отложений интерпретируется как кулисообразно сочетающаяся с региональным разломом Саухохский, расположенным на западе и востоке под ледниками. Выявленные кулисообразные нарушения высоких порядков классифицируются как постледниковые, проявленные в приледниковой зоне.

Участок Зарамаг (рис. 8.). Северо-западная часть площади Зарамагского участка занята одноименным ледником, на который обрушиваются с севера современные обвальные крупноглыбовые (до 15-20 м в поперечнике) продукты обрушения крутых скальных склонов, сейсмогравитационные оползни-срывы с правого борта приустьевой части долины р. Бубудон. Четвертичный комплекс отложений представляет собой дерупций голоценового возраста, деляпсий в виде оползней-блоков и оползней-потоков с признаками вязкопластичного течения и десерпций незакрепленных, полужакрепленных осыпных конусов и шлейфов скальных подножий дресвяно-щебенистого состава.

Опасным экзогенным геологическим процессам, в основном, подвержена юго-восточная часть площади, где наблюдается обвально-осыпной процесс с севера и запада с аккумуляцией продуктов обрушения в верховьях р. Зарамаг, образуя эрозионные уступы, бровки отрыва оползневых цирков. При интенсивных таяниях льдов, затяжных дождях или ливневых осадках аккумулярованный материал в виде оползневых блоков угрожают подвижками, запрудами и далее селевым потоком.

Из региональных тектонических нарушений участок Зарамаг субширотно пересекают Главный Кавказский надвиг на севере и Адайком-Казбекский взброс на юге, оба падающие на северо-восток.

Инструментально полученные данные развития тектонической активности под покровом четвертичных образований показывают приуроченность аномальных отклонений геофизических параметров к региональным нарушениям.

На основе пространственной связи активных глубинных тектонических нарушений и неотектоническое проявление в виде кулисообразно развитой трещиной тектоники, контролирующей тектономагматические события (землетрясения, локальное и зональное проявление сейсмодислокаций, выходы минерализованных источников, динамические и геофизические поля, концентрацию очагов развития

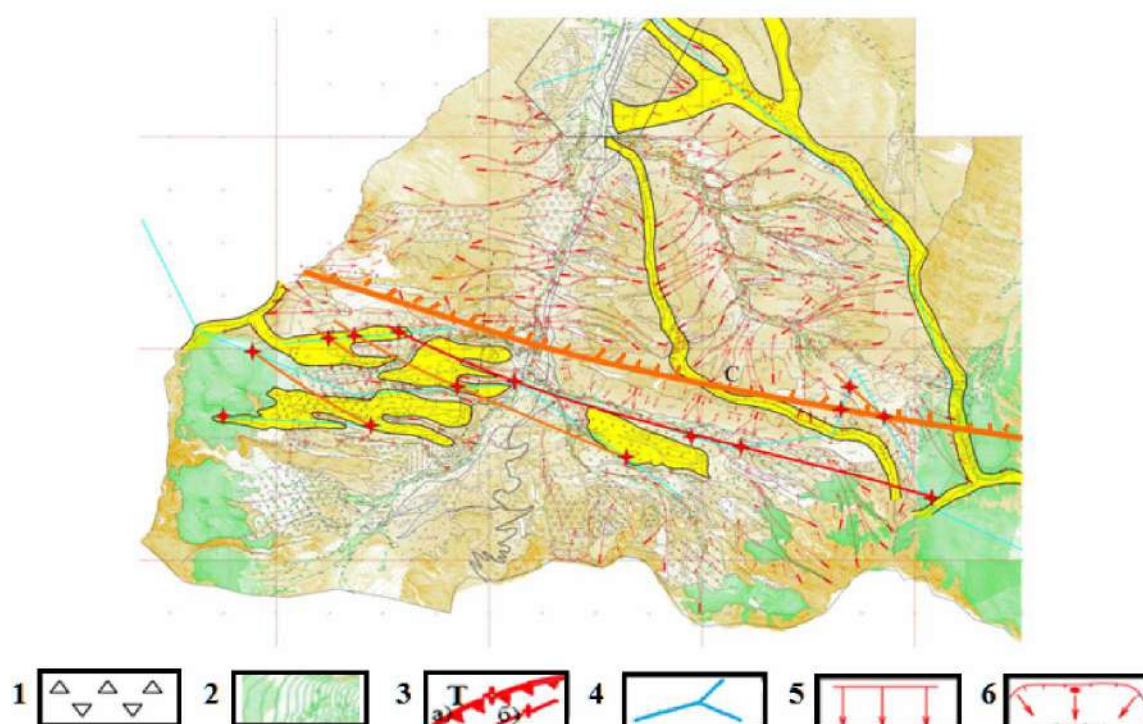


Рис. 7. Участок Земегон. Схема районирования по степени опасности геологических процессов с элементами тектонической накладкой по геофизическим данным Чотчаева Х. О.). М 1:10000
1 – обвальные накопления; 2 – ледники; 3 – тектонические нарушения: а – региональные, б – нарушения трещинного типа, выявленные геофизическими методами; 4 – линии канатных дорог; 5 – обвально-осыпные процессы; 6 – очаги постоянного формирования обвалов. /

Fig. 7. Site Zemegon. Zoning scheme according to the degree of danger of geological processes with elements of tectonic overlay (according to geophysical data Chotchaeva Kh. O.). Scale 1: 10000.
1 – landslide accumulations; 2 – glaciers; 3 – tectonic faults: a – regional, b – fracture-type faults identified by geophysical methods; 4 – cable car lines; 5 – landslide processes; 6 – foci of permanent formation of landslides.

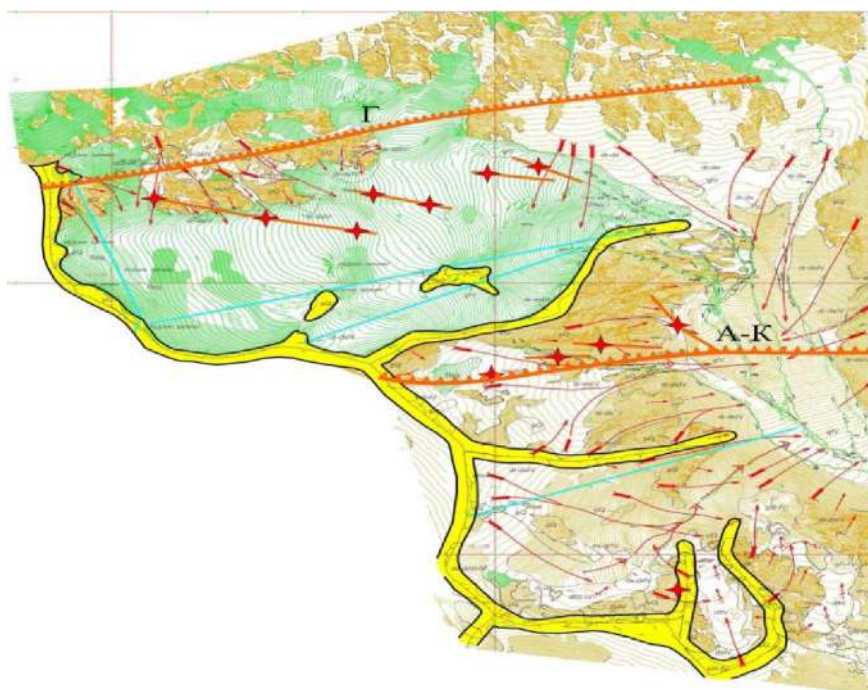


Рис. 8. Схема районирования по степени опасности геологических процессов по канатным дорогам участка Зарамаг с элементами тектоники по геофизическим данным Чотчаева Х. О., 2020 (Гончаренко О. А., 2012). М 1:10000. /

Fig. 8. Scheme of zoning according to the degree of danger of geological processes along ropeways of the Zaramag section with tectonic elements according to geophysical data Chotchaeva Kh. O., 2020 (Goncharenko O. A., 2012.). Scale 1: 10000.

опасных экзогенных процессов) делается утверждение о причинно-следственной связи эндогенных и экзогенных геологических процессов, где основной тренд гео-экологической эволюции определяют геодинамические процессы и в первую очередь эндогенные.

Четвертичные образования элювиального ряда, осыпные, пролювиальные, а также генетические типы смешанного генезиса, представленные обвальными-осыпными, делювиальными-осыпными и пролювиальными накоплениями относятся к позднеплейстоцен-голоценовому возрасту (400-300 тыс. лет назад).

В раннем неоплейстоцене (2,2-2,3 млн. лет назад) в условиях геодинамической обстановки коллизии Большой Кавказ уже обрел современный облик (Растворова, 1973), сохраняя средний по орогену темп роста 1,5-5,0 мм в год до настоящего времени. За период с позднеплейстоцена (четвертичные образования в основном имеют такой возраст накопления) горы прирастили дополнительно к достигнутым высотам 1200-1300 м, которые эродированы, транспортированы водными потоками и эоловым выветриванием далеко за пределы территории, часть перемещена в межгорные рифтогенные депрессии. При этом максимальная мощность четвертичных накоплений в долинах рек и межгорных впадинах на территории не превышает 100-120 м. Исходя из среднестатистической скорости прироста гор, возраста наиболее ранних четвертичных образований и мощности денудированного материала в долинах рек и межгорных депрессиях, скорость накопления не превышает 0,3-0,4 мм в год.

Стабилизация роста гор и скорости эрозионного сноса за позднеплейстоцен-голоценовый период развития предопределили медленное накопление в геоморфо-

логических понижениях рельефа остаточного материала, не вынесенного водными потоками и эоловым выветриванием по морфологическим причинам.

Потенциальные очаги опасных геологических процессов характеризуют геоэкологическую эволюцию за период их накопления (верхний неоплейстоцен-голоцен) и находятся в состоянии разной степени неустойчивого равновесия, выход из которого дополнительно требует определенного спускового фактора.

Заключение

Проведенные в рамках диссертационной работы исследования экспериментального и теоретического характера, позволили установить общие принципы энергетического обеспечения эндогенных процессов за счет гравитационной дифференциации силикатной мантии, люфта вращения твердого ядра, радиоактивного распада и незначительной энергии за счет преодоления приливных сил Луны и Солнца. Внутренняя энергия Земли представляется термической и ее избыток в РТ-условиях на границе слоя D проявляется восходящими мантийными плюмами и струями по конвективным ячейкам мантии. Попадая в трансформные разломы литосферных плит, энергия термическая преобразуется в механическое напряжение, по-видимому, за счет падения давления и соответствующего расширения, вызывая литосферный дрейф. В случае тектонических нарушений имеющих продолжение в мантию, часть плюма или мантийной струи продавливаются во внутрикоровые нарушения, проявляясь тектономагматическими, вулканическими процессами.

Определяющей последующие особенности структурно-тектонического развития взаимодействующих литосферных плит и характера тектогенеза является геодинамическая обстановка (для рассматриваемой территории это коллизия) с горообразованием, напользанием, торошением, субмеридиональным сжатием и развитием трещинной тектоники и землетрясениями деформационного характера. Взаимодействие плит происходит по трансформным разломам (Главный Кавказский надвиг, Южный надвиг), принимающих форму листрических за счет столкновения континентальных сред примерно равных плотностей, в результате чего на крутом участке фронта отмечается интенсивная дислокация и деформация пород, что и наблюдается на территории. Тектономагматическую активность определяют глубинные внутриплитные разломы (Ардонский, Владикавказский, Тибский, Цесский), которые совместно с коровыми разломами образуют ансамбли конвективных каналов восходящих мантийных струй. Динамические действия мантийных струй проявляются внедрением в жесткую среду коры, интрузией, смещением или разрывом внутрикоровых блоков за счет высокого давления или расширения при остывании, из-за чего происходит столкновение коровых блоков, вызывающее сколы (нарушения), дислокации, соскальзывание в исходное положение динамичного блока. В каждом из этих случаев будут проявляться землетрясения и тектонические преобразования.

Первопричинность проявлений эндогенных геодинамических процессов в активизации экзогенных геологических процессов и негативных изменений в геоэкологической эволюции является в диссертационной работе концептуальной. Геодинамическая активность проявляется эндогенными и экзогенными процессами при четко выраженном их единстве в пространственном проявлении.

1. Влияние эндогенных геодинамических процессов проявляется в сильнейшей дислоцированности пород в зоне коллизии, дифференцированной геоморфологии, высокой скорости прироста горообразования (относительные колебания отдельных

блоков достигает 15 мм/год), интенсивных землетрясениях, развитии трещинной тектоники с геоэкологическими последствиями крупных обвалов и осыпей коренных пород, широком накоплении покровов четвертичных отложений, питающих оползни.

2. Параметры сопутствующих факторов динамического, физико-химического, геофизического, гидрогеологического характера, являющиеся индикаторами эндогенных процессов и используются в качестве методологических признаков для прослеживания тектонических структур.

3. Сопутствующие геодинамическим факторам признаки физико-химического, геофизического, гидрогеологического характера, являющиеся индикаторами эндогенных процессов в течение длительного (в геологическом исчислении) времени, являются абиотическими факторами геоэкологической среды, к которым определенные виды фитоценоза и микробоценоза проявляют эндемическую зависимость.

4. Активные тектонические нарушения являются структурами связи атмосферы и литосферы, каналами: нисходящими для кислорода через биосферу и восходящими для многих летучих компонент литосферы в растворенном или газообразном состоянии. Состав восходящих элементов зависит от источника формирования конвективного течения, состава пород, пересекаемых разломом, месторождений, омываемых флюидами.

5. Естественная среднестатистическая геоэкологическая эволюция протекает в режиме примерного равновесия двух факторов: прироста гор и равнозначной приросту денудации; объем транзита эродированного материала за пределы территории водно-воздушными агентами составляет до 90%. переотложение остальных 10% происходит на месте в межгорных впадинах и долинах рек. Скорость накопления за период 300-400 тыс. лет составляет 0,3-0,4 мм в год.

6. Разработана методика контроля состояния объектов экзогенных геологических процессов сейсмическими наблюдениями за микросейсмическим режимом подстилающих коренных пород и объекта инструментальными средствами. При стабильной генерации в частотный спектр сейсмического события частот, совпадающих с собственными частотами колебаний объекта, последний может войти в резонанс. Трехкратное и более превышение резонансной амплитуды объекта над амплитудой микросейсмического фона, подстилающих коренных пород, представляет опасность нарушения статической устойчивости и перехода в режим неустойчивого равновесия или подвижки.

7. Полученные геофизические данные о тектоническом состоянии пород под четвертичным покровом характеризуют неотектоническую активность и ужесточают инженерно-геологические условия, установленные без учета этих данных, что рекомендуется учесть при проектных решениях.

8. Исследованный классификационный комплекс опасных эндогенных и экзогенных процессов определяет геоэкологическое состояние территории с точки зрения геоморфологических изменений и экологической эволюции, в целом, опасной.

Литература

1. Аплонов С. В. Геодинамика. – СПб.: Изд-во С.-Петерб. ун-та, 2001. – С. 74.
2. Астафьев Д. А. Группировки коромантийных плит в современной геодинамике Земли. Фундаментальные проблемы геотектоники. // Материалы XL Тектонического совещания Межведомственного тектонического комитета РАН. – М.: ГЕОС, 2007. – С. 31-35.

3. Астафьев Д. А. Уточнение основных положений концепции геодинамики Земли. Материалы XLVIII Тектонического совещания. // Тектоника, геодинамика и рудогенез складчатых поясов и платформ. 2 февраля-6 февраля 2016 г. Т. 1. – М.: ГЕОС. – С. 30-34.
4. Баркин Ю. В. Вековой дрейф центра масс Земли, обусловленный движением плит. // Вестник МГУ. Сер. 3. Физика, астрономия. – 1996. – Т. 37. № 2. – С. 79-85.
5. Бурдзиева О. Г., Чотчаев Х. О., Маммадли Т. Я. Модель поддерживаемого развития горных территорий Северного Кавказа. // Устойчивое развитие горных территорий. – 2016. – Т. 8. № 4. – С. 348-358. DOI: 10.21177/1998-4502-2016-8-4-348-358.
6. Вьюхина А. А. Биологическое действие локальных геомагнитных полей в зоне тектонического разлома. // Проблемы электромагнитной экологии в науке, технике и образовании: материалы VII Междунар. науч.-практ. семинара. – Ульяновск. – 2008. – С. 63-70.
7. Вьюхина А. А., Омельченко Г. В., Шиманская Е. И., Чохели В. А., Вардунни Т. В. Применение методов биотестирования для индикации закономерностей варьирования фенотипических и цитогенетических изменений растений индикаторов в зависимости от степени тектонической нарушенности зоны произрастания. // Известия ВУЗов. Северо-Кавказский регион. Естественные науки. – 2013. – С. 45-51.
8. Заалишвили В. Б., Чотчаев Х. О. Классификация естественных электромагнитных полей. Исследования методом Теллурических токов. // Геология и геофизика Юга России. – 2016. – № 2. – С. 27-35.
9. Комжа А. Л., Заалишвили В. Б. Фитоиндикация последствий схода ледника Колка 20.09.2002 г. – инструмент долгосрочного прогнозирования гляциальных катастроф в долине р. Геналдон. // Геофизические процессы и биосфера. – 2014. – Т. 13. № 1. – С. 74-80.
10. Лобковский Л. И., Котелкин В. Д. Двухъярусная термохимическая модель конвекции и ее геодинамические следствия. // Проблемы глобальной геодинамики. – М. – 2000. – С. 29-30.
11. Мазуров, Б. Т. Математическое моделирование при исследовании геодинамики. // Монография. – Новосибирск: Агентство «Сибпринт», 2019. – С. 13.
12. Малышков Ю. П., Джумабаев К. Б. Прогнозирование землетрясений по параметрам естественного импульсного электромагнитного поля Земли. // Вулканология и сейсмология. – 1987. – № 1. – С. 97-103.
13. Несмеянов С. А. Инженерная геотектоника. – М.: Наука, 2004. – С. 13-15.
14. Никонов А. А. Признаки молодой тектонической активности в зонах Южно-Азовского и Керченского разломов. // Геотектоника. – 1994. – № 5. – С. 16-27.
15. Пушаровский Д. Ю. Минеральные перестройки в глубинных геосферах. // Вестн. МГУ. Сер. 4, Геология. – 2004. – № 2. – С. 3-10.
16. Растворова В. А. Формирование рельефа гор. – Л.: Издательство «Наука», 1973. – С. 78.
17. Сорохтин О. Г., Ушаков С. А. Природа тектонической активности Земли. // Итоги науки и техники. Сер. Физика Земли. – 1993. – Т. 12.
18. Трифионов В. Г., Караханян А. С. Динамика Земли и развитие общества. // ОГИ. – М. – 2008. – С. 8-9.
19. Хаин В. Е., Ломизе М. Г. Геотектоника с основами геодинамики: 2-е изд., испр. и доп. – М.: КДУ, 2005. – С. 534.
20. Чотчаев Х. О., Колесникова А. М., Майсурадзе М. В., Шепелев В. Д. Физические поля как производные деформации горного массива и технология их мониторинга. // Геология и геофизика Юга России. – 2018. – № 4. – С. 179-190.
21. Чотчаев Х. О., Оганесян С. М., Гончаренко О. А. Опасные геологические процессы на территориях экономического освоения в горной части Республики Северная Осетия-Алания. Изд-во: Северо-Кавказский горно-металлургический институт (Государственный технологический университет) (Владикавказ). DOI: 10.21177/1998-4502-2017-9-3-195-210. – 2017. – Т. 9. № 3.
22. Шеко А. И. Закономерности формирования и прогноз селей. – М.: Недра, 1980. – 296 с.

23. Яроцкий Г. П., Чотчаев Х. О. Тектоническая предопределенность Хаилинского землетрясения на Юго-Западе Корякского нагорья. // Геология и геофизика Юга России. – 2016. – № 4. – С. 129-140.
24. Яроцкий Г. П., Чотчаев Х. О. Вулканогены окраинных орогенных поясов Северо-Западного сектора Северо-Восточной Азии. // Геология и геофизика Юга России. – 2019. – Т. 9. № 3. – С. 18-35.
25. Allen C. R. Geological criteria for evaluating seismicity. // *Bul. Geol. Soc. Amer.* – 1975. – Vol. 86. No. 8. – pp. 1041-1057.
26. Boyet M, Blichert-Toft J., Rosing M, Storey M, Telouk P., Albarede F. 142Nd evidence for early Earth differentiation. // *Earth and Planet. Sci. Lett.* – 2003. – Vol. 214. – pp. 427-442.
27. Bull W. B. *Geomorphic responses to climatic change.* – New York: Oxford University Press, 1991. – p. 326.
28. Bull W. B., McFadden L. Tectonic geomorphology North and South of the Garlock fault, California. In: Doehring, D. O. (Ed.), *Geomorphology in Arid Regions.* // *Publ. in Geomorphology, State University of New York, Binghamton.* – 1977. – pp. 115-138.
29. Burbank D. W., Anderson R. S. *Tectonic Geomorphology.* // Blackwell Science. – 2001. – Vol. 43. – pp. 105-129.
30. Peters G., Van Balen R. T. Tectonic geomorphology of the northern Upper Rhine Graben, Germany. // *Glob. Planet. Chang.* – 2007. – Vol. 58. – pp. 310-334.
31. Duvillard P-A, Ravanel L., Deline Ph. Risk assessment of infrastructure destabilisation due to global warming in the high French Alps. // *Journal of Alpine Research. Revue de géographie alpine.* – 2015. – Vol. 103-2. – pp. 1-15.
32. Evans S. G., Bishop N. F., Smoll L. F., Murillo P. V., Delaney K. B., Oliver-Smith A. A re-examination of the mechanism and human impact of catastrophic mass flows originating on Nevado Huascarán, Cordillera Blanca, Peru in 1962 and 1970. // *Engineering Geology.* – 2009. – Vol. 108. No. 1-2. – pp. 96-118.
33. Flavio C. T. Lima, Alexandre C. Ribeiros. Continental Scale Tectonic Controls of Biogeography and Ecology. // *Historical biogeography of Neotropical freshwater fishes.* – 2011. – pp. 164.
34. Ktern K., Lieb G. K., Seier G., Kellerer-Pirkibaue A. Modelling geomorphological hazards to assess the vulnerability of alpine infrastructure: The example of the Großglockner-Pasterze area, Austria. // *Austrian Journal of Earth Sciences.* – 2012. – Vol. 105/2.
35. Keller E. A. Pinter N. *Active Tectonics: Earthquakes, Uplift, and Landscape.* – New York: Prentice Hall, 2012. – pp. 432.
36. Heads M. The New Zealand grass *Simplicia*: biogeography, ecology and tectonics. // *Australian Systematic Botany.* – 2018. – Vol. 31. – pp. 281-295.
37. Muir Wood R. Tectonic ecology. // *Trends Ecol Evol.* – 1987. – No. 2 (9). – pp. 276-279. doi:10.1016/0169-5347 (87) 90036-X.
38. Persaud M., Pfiffner O. A. Active deformation in the eastern Swiss Alps: post-glacial faults, seismicity and surface uplift. // *Tectonophysics.* – 2004. – Vol. 385. – pp. 59-84.
39. Robinson T. R., Davies T. R. H. Review article: Potential geomorphic consequences of a future great (Mw $\frac{1}{4}$ 8.0) Alpine Fault earthquake, South Island, New Zealand. // *Natural Hazards and Earth System Sciences.* – 2013. – Vol. 13. – pp. 2279-2299.
40. Trewick S. A. Plate Tectonics in Biogeography. *The International Encyclopedia of Geography.* / Edited by Douglas Richardson, Noel Castree, Michael F. Goodchild, Audrey Kobayashi, Weidong Liu, and Richard A. Marston. // Published 2017 by John Wiley & Sons, Ltd. – 2017. DOI: 10.1002/9781118786352. wbieg 0638.
41. Veblen T. T., González M. E., Stewart G. H., Kitzberger T. & Brunet J. Tectonic ecology of the temperate forests of South America and New Zealand. // *New Zealand Journal of Botany.* – 2016. – Vol. 54 (2). – pp. 1-24. DOI: 10.1080/0028825X.2015.1130726.
42. Yuen D. A., Maruyama Sh., Karato Sh-i., Windley B. F. *Superplumes: Beyond Plate Tectonics.* // Eds. The Netherlands: Springer. – 2007. – 569 p.

43. Zaalishvili V., Chotchaev Kh., Melkov D., Burdzieva O., Dzeranov B., Kanukov A., Archireeva I., Gabaraev A. and Dzobelova L. Geodetic, geophysical and geographical methods in landslide investigation: Luar case study. // Web of Conferences Volume 164 Topical Problems of Green Architecture, Civil and Environmental Engineering. TPACEE. – 2019. DOI: <https://doi.org/10.1051/e3sconf/202016401014>.

References

1. Aplonov S. V. Geodynamics. St. Petersburg. Publishing house of St. Petersburg. University, 2001. p. 74. (In Russ.)
2. Astaf'ev D. A. Groupings of crust-mantle plates in the modern geodynamics of the Earth. Fundamental problems of geotectonics. In: Proceedings of the XL Tectonic Meeting of the Interdepartmental Tectonic Committee of the Russian Academy of Sciences. Moscow. GEOS. 2007. pp. 31-35. (In Russ.)
3. Astaf'ev D. A. Clarification of the main provisions of the concept of Earthgeodynamics. In: Proceedings of XLVIII Tectonic Meeting. Tectonics, geodynamics and ore genesis of fold belts and platforms. February 2-February 6, 2016 Moscow. GEOS. Vol. 1. pp. 30-34. (In Russ.)
4. Barkin Yu. V. The secular drift of the Earth's center of mass due to plate movement. Moscow State University Bulletin. Ser. 3. Physics, astronomy. 1996. Vol. 37, No. 2. pp. 79-85. (In Russ.)
5. Burdzieva O. G., Chotchaev Kh. O., Mammadli T. Ya. A model for the supported development of mountainous areas in the North Caucasus. Sustainable Development of Mountain Territories. Vol. 8 No. 4. 2016. pp. 348-358. DOI: 10.21177/1998-4502-2016-8-4-348-358. (In Russ.)
6. V'yukhina A. A. Biological action of local geomagnetic fields in the tectonic fault zone. In: Proceedings of the VII Intern. scientific-practical seminar. Problems of electromagnetic ecology in science, technology and education. Ulyanovsk, 2008. pp. 63-70. (In Russ.)
7. V'yukhina A. A., Omel'chenko G. V., Shimanskaya E. I., Chokheli V. A., Varduni T. V. Application of biotesting methods to indicate the patterns of variation in phenotypic and cytogenetic changes in indicator plants depending on the degree of tectonic disturbance of the growth zone. Izvestiya VUZov. North Caucasian region. Natural Sciences. 2013. pp. 45-51. (In Russ.)
8. Zaalishvili V. B., Chotchaev Kh. O. Classification of natural electromagnetic fields. Research by the method of Telluric currents. Geology and geophysics of Russian South. 2016. No. 2. pp. 27-35. (In Russ.)
9. Komzha A. L., Zaalishvili V. B. Phytoindication of the consequences of the Kolka glacier collapse on 20.09.2002 is a tool for long-term forecasting of glacial disasters in Genaldon. Geophysical processes and biosphere. 2014. Vol. 13. No. 1. pp. 74-80. (In Russ.)
10. Lobkovskii L. I., Kotelkin V. D. Two-tier thermochemical model of convection and its geodynamic consequences. Problems of global geodynamics. Moscow, 2000. pp. 29-30. (In Russ.)
11. Mazurov B. T. Mathematical modeling in the study of geodynamics. Monograph. Novosibirsk. Agency "Sibprint", 2019. P. 13. (In Russ.)
12. Malyshev Yu. P., Dzhumabaev K. B. Prediction of earthquakes by the parameters of the natural pulsed electromagnetic field of the Earth. Volcanology and seismology. 1987. No. 1. pp. 97-103. (In Russ.)
13. Nesmeyanov S. A. Engineering geotectonics. Moscow, Nauka, 2004. pp. 13-15. (In Russ.)
14. Nikonov A. A. Signs of young tectonic activity in the zones of the South Azov and Kerch faults. Geotektonika. 1994. No. 5. pp. 16-27. (In Russ.)
15. Pushcharovskii D. Yu. Mineral changes in deep geospheres. Vestnik. Moscow State University. Ser. 4, Geology. 2004. No. 2. pp. 3-10. (In Russ.)

16. Rastvorova V. A. Formation of the mountainrelief. Leningrad. Publishing house "Nauka". 1973. pp. 78. (In Russ.)
17. Sorokhtin O. G., Ushakov S. A. The nature of tectonic activity of the Earth. Results of Science and Technology. Ser. Physics of the Earth. Moscow, 1993. Vol. 12. (In Russ.)
18. Trifonov V. G., Karakhanyan A. S. Dynamics of the Earth and the development of society. OGI. Moscow. 2008. pp. 8-9. (In Russ.)
19. Khain V. E., Lomize M. G. Geotectonics with the basics of geodynamics: 2nd ed., Revised. and add. Moscow. KDU, 2005. pp. 534. (In Russ.)
20. Chotchaev Kh. O., Kolesnikova A. M., Maisuradze M. V., Shepelev V. D. Physical fields as derivatives of rock mass deformation and technology for their monitoring. Geology and geophysics of Russian South. 2018. No. 4. pp. 179-190. (In Russ.)
21. Chotchaev Kh. O., Oganesyanyan S. M., Goncharenko O. A. Dangerous geological processes in the territories of economic development in the mountainous part of the Republic of North Ossetia – Alania. Vol. 9. Issue 3 (33). 2017. North Caucasian Mining and Metallurgical Institute (In Russ.) DOI: 10.21177/1998-4502-2017-9-3-195-210.
22. Sheko A. I. Regularities of formation and forecast of mudflows. Moscow. Nedra, 1980, 296 p. (In Russ.)
23. Yarotskiy G. P., Chotchaev Kh. O. Tectonic predetermination of the Khailin earthquake in the Southwest of the Koryak Upland. Geology and geophysics of Russian South. 2016. No. 4. pp. 129-140. (In Russ.)
24. Yarotskiy G. P., Chotchaev Kh. O. Volcanogens of the marginal orogenic belts of the Northwestern sector of Northeast Asia. Geology and geophysics of Russian South. 2019. Vol. 9. No. 3. pp. 18-35. (In Russ.)
25. Allen C. R. Geological criteria for evaluating seismicity. Bul. Geol. Soc. Amer. 1975. Vol. 86. No. 8. pp. 1041-1057.
26. Boyet M., Blichert-Toft J., Rosing M., Storey M., Telouk P., Albarede F. 142Nd evidence for early Earth differentiation. Earth and Planet. Sci. Lett. 2003. Vol. 214. pp. 427-442.
27. Bull W. B. Geomorphic responses to climatic change. New York. Oxford University Press. 1991. p. 326.
28. Bull W. B., McFadden L. Tectonic geomorphology North and South of the Garlock fault, California. In: Doehring, D. O. (Ed.), Geomorphology in Arid Regions. Publ. in Geomorphology, State University of New York, Binghamton. 1977. pp. 115-138.
29. Burbank D. W., Anderson R. S. Tectonic Geomorphology. Blackwell Science. 2001. Vol. 43. pp. 105-129.
30. Peters G., Van Balen R. T. Tectonic geomorphology of the northern Upper Rhine Graben, Germany. Glob. Planet. Chang. 2007. Vol. 58. pp. 310-334.
31. Duvillard P-A, Ravanel L., Deline Ph. Risk assessment of infrastructure destabilisation due to global warming in the high French Alps. Journal of Alpine Research. Revue de géographie alpine. 2015. Vol. 103-2. pp. 1-15.
32. Evans S. G., Bishop N. F., Smoll L. F., Murillo P. V., Delaney K. B., Oliver-Smith A. A re-examination of the mechanism and human impact of catastrophic mass flows originating on Nevado Huascarán, Cordillera Blanca, Peru in 1962 and 1970. Engineering Geology. 2009. Vol. 108. No. 1-2. pp. 96-118.
33. Flavio C. T. Lima, Alexandre C. Ribeiros. Continental Scale Tectonic Controls of Biogeography and Ecology. Historical biogeography of Neotropical freshwater fishes. 2011. pp. 164.
34. Ktern K., Lieb G. K., Seier G., Kellerer-Pirkibaue A. Modelling geomorphological hazards to assess the vulnerability of alpine infrastructure: The example of the Großglockner-Pasterze area, Austria. Austrian Journal of Earth Sciences. 2012. Vol. 105/2.
35. Keller E. A. Pinter N. Active Tectonics: Earthquakes, Uplift, and Landscape. New York. Prentice Hall. 2012. pp. 432.

36. Heads M. The New Zealand grass *Simplicia*: biogeography, ecology and tectonics. *Australian Systematic Botany*. 2018. Vol. 31. pp. 281-295.
37. Muir Wood R. Tectonic ecology. *Trends Ecol Evol*. 1987. No. 2 (9). pp. 276-279. doi:10.1016/0169-5347 (87) 90036-X.
38. Persaud M., Pfiffner O. A. Active deformation in the eastern Swiss Alps: post-glacial faults, seismicity and surface uplift. *Tectonophysics*. 2004. Vol. 385. pp. 59-84.
39. Robinson T. R., Davies T. R. H. Review article: Potential geomorphic consequences of a future great (Mw $\frac{1}{4}$ 8.0b) Alpine Fault earthquake, South Island, New Zealand. *Natural Hazards and Earth System Sciences*. 2013. Vol. 13. pp. 2279-2299.
40. Trewick S. A. Plate Tectonics in Biogeography. *The International Encyclopedia of Geography*. Edited by Douglas Richardson, Noel Castree, Michael F. Goodchild, Audrey Kobayashi, Weidong Liu, and Richard A. Marston. Published 2017 by John Wiley & Sons, Ltd. 2017. DOI: 10.1002/9781118786352. wbieg 0638.
41. Veblen T. T., González M. E., Stewart G. H., Kitzberger T. & Brunet J. Tectonic ecology of the temperate forests of South America and New Zealand. *New Zealand Journal of Botany*, 2016. Vol. 54 (2). pp. 1-24. DOI: 10.1080/0028825X. 2015.1130726.
42. Yuen D. A., Maruyama Sh., Karato Sh-i., Windley B. F. Superplumes: Beyond Plate Tectonics. Eds. The Netherlands: Springer. 2007. 569 p.
43. Zaalishvili V., Chotchaev Kh., Melkov D., Burdzieva O., Dzeranov B., Kanukov A., Archireeva I., Gabaraev A. and Dzobelova L. Geodetic, geophysical and geographical methods in landslide investigation: Luar case study. *Web of Conferences Volume 164 Topical Problems of Green Architecture, Civil and Environmental Engineering*. TPACEE. 2019. DOI: <https://doi.org/10.1051/e3sconf/202016401014>.

УДК 550.8.08

DOI: [10.46698/VNC.2020.69.97.006](https://doi.org/10.46698/VNC.2020.69.97.006)

Оригинальная статья

Влияние сезонного изменения уровня воды в Чиркейском водохранилище на кажущееся сопротивление пород Хадумского купола, расположенного в его окрестности

А. В. Дещеревский¹, Ш. Г. Идармачев², И. Ш. Идармачев²

¹Институт физики Земли им. О. Ю. Шмидта РАН, Россия, 123995, г. Москва, ул. Большая Грузинская, 10, корп. 2;

²Институт геологии Дагестанского федерального исследовательского центра Российской Академии наук, Россия, 367030, Республика Дагестан, Махачкала, ул. Ярагского, д. 75, e-mail: idarmasyev@yandex.ru

Статья поступила: 02.08.2020, после рецензирования: 22.09.2020, принята к публикации: 16.10.2020

Резюме: Актуальность работы. Природа возникновения техногенной сейсмичности в районах крупных водохранилищ остается пока мало изученной в силу отсутствия новых геофизических экспериментальных данных, за исключением сейсмологических. Вместе с тем крупномасштабный долговременный мониторинг в районах ГЭС позволяет исследовать механизм влияния водохранилища на окружающую среду. Один из таких экспериментов был проведен в районе Чиркейского водохранилища, расположенного на Северном Кавказе, в течение 9.5 лет с 1998 по 2007 гг. методом дипольного электрического зондирования. **Цель работы** – исследование техногенного влияния сезонных колебаний уровня водохранилища на окружающие его горные породы. **Метод исследований.** Для измерения кажущегося электрического сопротивления большого массива горных пород применялся метод глубинного дипольного электрического зондирования разносом диполей 5,6 км. Зондирование проводилось ежедневно. Для измерений использовалась специально разработанная аппаратура: цифровая приемная станция и генератор мощностью 25 кВт. **Результаты работы.** Изучено влияние сезонных изменений уровня воды в водохранилище на кажущееся электрическое сопротивление пород, расположенных в окрестности Чиркейской ГЭС, установлена связь с периодом максимальной скорости заполнения водохранилища. Предполагается, что сезонные вариации кажущегося сопротивления пород купола обусловлены деформацией вертикальных трещинных зон под воздействием изменяющейся нагрузки водохранилища. Процесс деформации вертикальных трещинных зон, расположенных между диполями измерительной установки, приводит к изменению их проводимости, вызывая, тем самым, в исследуемом массиве эффект «экранирования» поля питающего диполя от местоположения приемного диполя. Полученные данные показывают влияние изменения сезонной нагрузки Чиркейского водохранилища на окружающую среду, активизируя тем самым развитие опасных геологических процессов в районе водохранилища, подвижки по разломным зонам, обрушение неустойчивых скальных массивов, оползней, суффозий и др.

Ключевые слова: среднесезонная функция, кажущееся сопротивление горных пород, дипольная установка, питающий диполь, сезонные вариации, тензочувствительность.

Для цитирования: Дещеревский А.В., Идармачев Ш.Г., Идармачев И.Ш. Влияние изменения уровня воды в Чиркейском водохранилище на кажущееся сопротивление пород Хадумского купола, расположенного в его окрестности. *Геология и геофизика Юга России*. 2020. 10 (4): 101 – 112. DOI: [10.46698/VNC.2020.69.97.006](https://doi.org/10.46698/VNC.2020.69.97.006).

Благодарности: Работа выполнена по госзаданиям Института физики Земли им. О. Ю. Шмидта РАН № 0144-2019-0011 и Института геологии ДФИЦ РАН № НИОКТР АААА-А17-117021310201-9.

DOI: [10.46698/VNC.2020.69.97.006](https://doi.org/10.46698/VNC.2020.69.97.006)

Original paper

Effect of seasonal changes in water level in Chirkey reservoir on the apparent resistivity of rocks of Khadumskiy dome, located in its surroundings

A. V. Desherevsky¹, **Sh. G. Idarmachev**², **I. Sh. Idarmachev**²¹Schmidt Institute of Physics of the Earth, Russian Academy of Sciences, 10/1
Bolshaya Gruzinskaya Str., Moscow 123242, Russian Federation;²Institute of Geology, Dagestan Federal Research Center, Russian Academy
of Sciences, 75 Yaragского str., Makhachkala 367030, Russian Federation,
e-mail: idarmachev@yandex.ru

Received: 02.08.2020, revised: 22.09.2020, accepted: 16.10.2020

Abstract: Relevance. The nature of the occurrence of technogenic seismicity in the areas of large reservoirs remains poorly studied due to the lack of new geophysical experimental data, except for seismological ones. At the same time, large-scale long-term monitoring in HPP areas allows us to study the mechanism of the reservoir's impact on the environment. One of these experiments was conducted in the area of the Chirkey reservoir, located in the North Caucasus, for 9.5 years from 1998 to 2007 using the method of dipole electric sensing. **Aim.** The purpose of this work is to study the geodynamic process of rocks in the area of a large reservoir caused by seasonal fluctuations in its level. **Methods.** To measure the apparent electrical resistance of a large rock mass, the method of deep dipole electric sounding at a constant current with a measuring dipole distance of 5.6 km was used. Probing was conducted daily. The equipment, a digital receiving station and a 25 kW generator were specially designed for this purpose. **Result.** As a result of the analysis of the relationship between the data series of the apparent electrical resistance of a large rock mass located in the Northern vicinity of the Chirkey HPP and seasonal changes in the water level in the reservoir, a connection was established with the period of the maximum rate of filling of the reservoir. The mechanism of seasonal variations in apparent resistance is due to the deformation of rocks under the influence of changing reservoir load. The process of deformation of vertical crack zones located between the dipoles of the measuring unit leads to a change in their conductivity, thereby causing the effect of "shielding" the field of the feeding dipole from the location of the receiving dipole in the studied array. The obtained data show the impact of changes in the seasonal load of the Chirkey reservoir on the environment, activating the manifestation of dangerous geological processes in the reservoir area, the collapse of unstable rock massifs, landslides.

Keywords: average seasonal function, apparent resistance of rocks, dipole installation, feeding dipole, seasonal variations, strain sensitivity.

For citation: Desherevsky A.V., Idarmachev S.G., Idarmachev I.S. Influence of change of water level in Chirkey reservoir on the apparent resistivity of rocks of Khadumskiy dome, located in its surroundings. *Geologiya i Geofizika Yuga Rossii = Geology and Geophysics of Russian South*. (in Russ.). 2020. 10 (4): 101 – 112. DOI: 10.46698/VNC.2020.69.97.006.

Acknowledgments: The work was carried out according to the state orders of the Institute of Physics of the Earth, RAS No. 0144-2019-0011 and the Institute of Geology, DFRC of RAS No. NIOKTR AAAA-A17-117021310201-9.

Введение

Цель работы – исследование влияния уровня воды Чиркейского водохранилища на кажущееся сопротивление пород Хадумского купола. Электрические параметры горных пород являются наиболее чувствительными к деформации, как в упругом режиме сжатия-растяжения, так и в период подготовки разрушения. Высокая тензочувствительность по электрическому сопротивлению характерна для диапазона малых деформаций 10^{-5} – 10^{-6} , при этом максимальные значения коэффициента тензочувствительности порядка 10^5 – 10^6 достигаются, когда породы находятся в естественных условиях в земной коре [Honkura, 1976; Fitterman, Madden, 1977; Morrison et al., 1977, 1979; Searls et al., 1978; Milne, 1980; Qian, 1985; Morrison, Fernandez, 1986; Fuye et al., 1988; Panteleev, Gavrilov, 2015]. Поэтому электрические методы могут успешно применяться для исследования техногенных процессов в массивах горных пород в районе водохранилища. Так, например, анализ данных между сезонными вариациями уровня водохранилища и кажущимся сопротивлением небольшого блока пород, примыкающего к плотине Чиркейской ГЭС за 2010–2015 гг. показал, что коэффициент корреляции между ними равен $-0,94$, при этом временная задержка сопротивления от уровня воды составляет 12 суток. Это означает, что процесс фильтрации воды из водохранилища в окружающий массив требует определенного времени [Идармачев и др., 2019]. Эти данные показывают, что влияние на окружающую среду оказывает не только процесс заполнения крупного водохранилища на 100 и более метров, но и сезонные изменения уровня воды, достигающие 40 м. Влияние на геодинамический процесс оказывает также скорость изменения уровня воды в водохранилище. Резкое понижение уровня воды на различных водохранилищах мира приводило к образованию свищей в придонной области верхнего бьефа, образованию трещин в приконтактной зоне плотины [Savich, 1998]. Исследование этих процессов имеет не только научное значение в области изучения техногенного влияния человека на окружающую среду, но дает возможность практического применения экспериментальных результатов для повышения безопасности ГЭС.

Следует также отметить, что в районах с высокой тектонической активностью даже незначительное внешнее воздействие может привести к подвижкам блоков, если они находятся в условиях неустойчивого равновесия [Gavrilov et al., 2020]. Район Чиркейского водохранилища расположен именно в том месте, где блоки находятся в поле влияния крупных тектонических разломов трассирующихся вдоль западного побережья Каспия [Черкашин и др., 2012]. Данный район является высокосейсмичным, включая наведенную сейсмичность при заполнении водохранилища [Идармачев и др., 2019]. В период строительства ГЭС в 1970 г. здесь произошло одно из сильнейших землетрясений на Кавказе с магнитудой $M=6,6$. После заполнения в 1974 г. в его ближайших окрестностях произошло четыре землетрясения $M=5,0$ – $5,7$.

Для анализа связи между уровнем водохранилища (Нвдх) и кажущимся сопротивлением (R_k) Хадумского купола использовались данные дипольного зондирования Дагестанского филиала Геофизической службы РАН за период 1999–2007 гг. [Даниялов и др., 2003]. Первоначальной целью наблюдений являлось изучение предвестников землетрясений. При этом один из перспективных подходов связывался с применением методов фликкер-шумовой спектроскопии [Descherevsky et al., 2003], поскольку анализ данных электрометрических наблюдений показывает,

что именно такой характер поведения сигналов является типичным для этих процессов [Descherevsky et al., 2000]. Однако закономерности техногенного влияния сезонного изменения уровня воды в водохранилище на электрические параметры горных пород, полученные позднее в районе плотины ГЭС, позволили предположить возможность сезонного геодинамического процесса для большого объема пород, как Хадумский купол.

Метод исследований

Космоснимок района исследований показан на рисунке 1. Хадумский купол, расположен в северной окрестности Чиркейского водохранилища. Высотная отметка от уровня моря равна 900 м, а от уровня водохранилища – 680 м.

Река Сулак, на которой расположены 7 ГЭС на территории Дагестана, протекает в глубоком каньоне с обрывистыми бортами. Плотина самой крупной Чиркейской ГЭС имеет высоту 232 м, образуя водохранилище объемом $2,9 \text{ км}^3$ при максимальном уровне воды в водохранилище. Сезонное изменение уровня водохранилища составляет 40 м, при этом изменение объема воды равно $1,3 \text{ км}^3$.

Дипольное зондирование осуществлялось на постоянном токе с использованием электрических диполей. Расположение генераторной и приемной станций пока-



Условные обозначения

• 1 Г 2 П 3

Рис. 1. Космоснимок района Хадумского купола: 1 – места заземлений диполей; 2 – генератор; 3 – приемник. /

Fig. 1. Satellite Image of the Khadum dome area: 1 – dipole earthing points; 2 – generator; 3 – receiver.

зано на рисунке 1. Зондирование производилось ежедневно по сигналу точного времени в 12 часов с некоторыми перерывами в отдельные дни. Питающий диполь (Г) длиной 700 м располагался в южной части основания купола, а приемный диполь (П) – закреплен на вершине купола. Длина приемного диполя равна 150 м, при этом его азимутальное направление было выбрано с учетом максимального уровня сигнала. Для исключения утечек тока на линиях диполей провода подвешены на столбах с изоляторами. Расстояние между центрами излучающего и приемного диполей равно 5,6 км. Излучающий диполь питает генератор мощностью 25 кВт. В землю при помощи электрической линии, концы которой соединены с десятью металлическими штырями, забитыми в грунт, пропускают ток $I=20-25$ А в виде серии из 50 знакопеременных импульсов прямоугольной формы. Одновременно на питающей и приемной станциях производится запись зондирующих импульсов при помощи цифрового вольтметра Ц300 (класс точности 0,02) с цифropечатью. Процесс обработки зондирования заключается в вычислении средних значений амплитуд тока в питающей линии (I) и разности потенциалов на приемной линии (ΔU). Величина R_k определяется по известной формуле:

$$R_k = K (\Delta U / I), (1)$$

где K – геометрический коэффициент дипольной установки, зависящий от расстояния и азимутального угла между диполями.

Среднеквадратичное отклонение результатов измерений не превышает $\pm 5-6\%$. В графическом виде результаты измерений представлены как отклонения R_k от его первоначально измеренного значения, выраженные в процентах. Более подробно методика измерений описана в работе [Идармачев, Алиев, 2013].

Графики кажущегося сопротивления и уровня Чиркейского водохранилища представлены на рисунке 2.

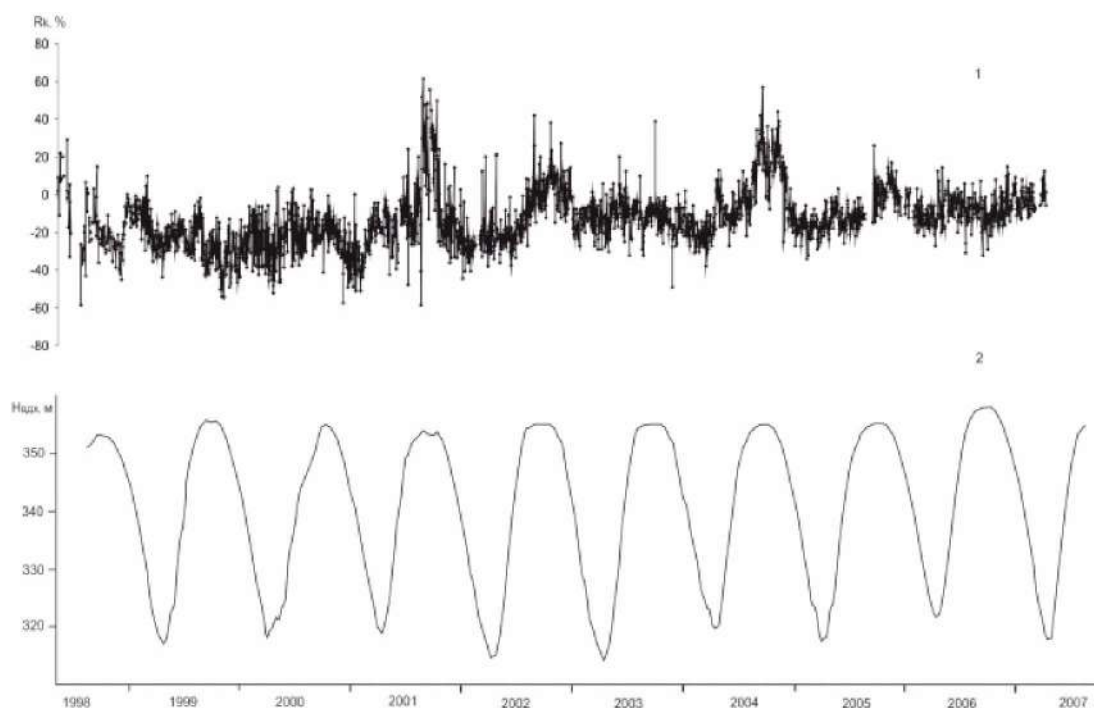


Рис. 2. Графики кажущегося сопротивления (1) и уровня водохранилища (2)

Fig. 2. Graphs of apparent resistance (1) and reservoir level (2)

Вначале для взаимного анализа данных была сделана интерполяция данных измерений уровня водохранилища к суточному шагу, одинаковому с шагом измерения R_k . Такая возможность имеется благодаря наличию 40-летнего (1976-2016 гг.) ряда измерений уровня, включающего многолетний период ежесуточных измерений уровня после 2010 г. Это позволяет оценить среднесезонную функцию [Дещеревский, Сидорин, 1999] измерений уровня, а затем использовать ее в качестве модели для интерполяции сигнала [Дещеревский и др., 2017].

Анализ связи R_k и уровня воды в водохранилище

Поскольку уровень воды имеет сильнейшую сезонную регуляцию (на нее приходится более 90% дисперсии ряда), анализ проводился по сезонным компонентам рядов.

Расчет сезонной компоненты R_k и Нвдхр проводился по методике [Дещеревский и др., 2016]. Эта методика предполагает расчет сезонной вариации методом наложения эпох с последующим сглаживанием. Цель сглаживания – подавление случайных высокочастотных флуктуаций среднесезонной функции (ССФ). Поэтому оптимальная величина сглаживания подбирается, исходя из степени variability сезонного хода от года к году, амплитуды высокочастотных шумов, числа периодов сезонности, по которым рассчитана ССФ.

Для ряда R_k среднесезонная функция рассчитывалась по стандартной схеме [Дещеревский, Сидорин, 1999]. В соответствии с указанными методическими оценками, окно сглаживания ССФ было выбрано равным 61 сут. На рисунке 3 показано сравнение ССФ R_k и ССФ Нвдх. Видно, что кривые сильно отличаются как по форме, так и по фазе.

Интересно, что ССФ R_k имеет сложную форму с двумя максимумами: основным в конце января – начале февраля и в августе, но с меньшей амплитудой. Аналогичная сложная форма сезонного хода кажущегося сопротивления в верхних слоях земной коры была ранее обнаружена при наблюдениях на Гармском полиго-

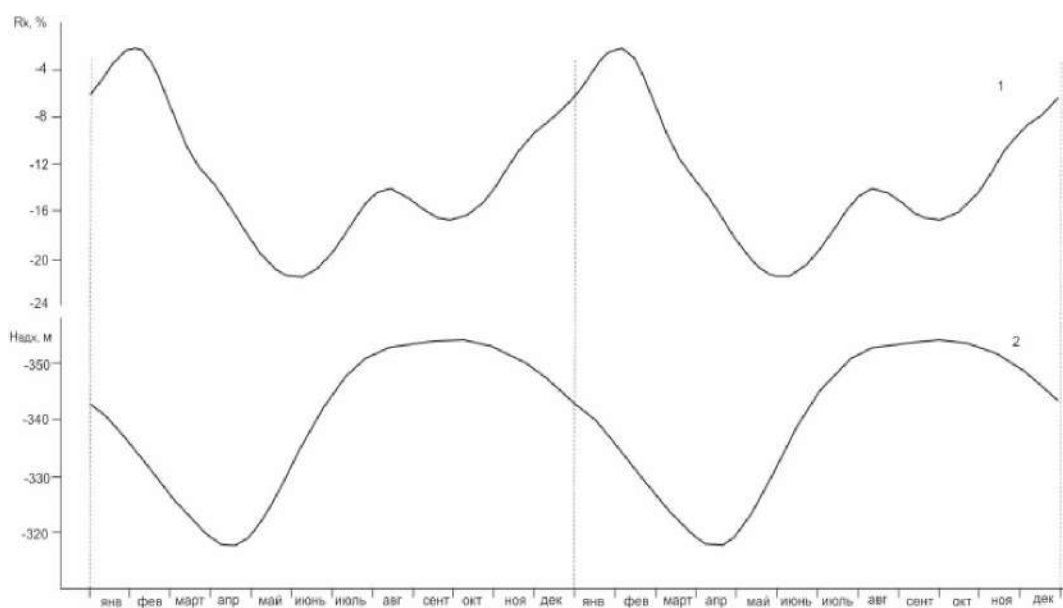


Рис. 3. Среднесезонные функции кажущегося сопротивления (1) и уровня водохранилища (2) /
Fig. 3. Average seasonal function of apparent resistivity (1) and reservoir level (2)

не [Descherevsky, Sidorin, 2004; Дещеревский и др., 2018]. Формально оцененный сдвиг фаз составляет 80 сут. Максимум сопротивления достигается через 4 месяца после максимального уровня воды в водохранилище. Минимум сопротивления наблюдается в июне, через 2 месяца после минимума уровня воды в водохранилище. Вторичный (августовский) максимум сопротивления согласуется по фазе с завершением периода сезонного роста уровня воды в водохранилище. Однако его амплитуда намного меньше, чем у главного максимума сопротивления, а продолжительность во времени – намного короче, чем продолжительность летнего максимума уровня воды.

Таким образом, сезонные изменения сопротивления не могут быть объяснены в рамках модели, предполагающей увеличение или уменьшение обводненности пород в основании Хадумского купола, согласованной с изменениями уровня в водохранилище, и определяющей зависящее от этого процесса перераспределение зондирующего тока. В том числе, непригодной оказывается и гипотетическая модель, связывающая рост кажущегося сопротивления с увеличением проводимости нижнего горизонта, из-за чего токи «уходят вглубь» и напряжение на приемной линии падает.

Альтернативный вариант модели, основанной на прямом гидрологическом воздействии водохранилища на породы Хадумского купола, может включать, помимо обводненности, также параметр минерализации. Теоретически можно допустить, что породы в основании Хадумского купола находятся в зоне полного обводнения в течение всего года, однако минерализация подземных вод меняется в зависимости от скорости фильтрации. В рамках этой модели минерализация должна уменьшаться в период с июля по январь, когда уровень водохранилища и скорость фильтрации максимальны. С февраля по июнь скорость фильтрации меньше, и флюид успевает накопить в себе больше растворенных веществ в ходе фильтрации, из-за чего его проводимость возрастает. Однако такая модель тоже не очень хорошо согласуется с графиком сезонного хода сопротивления. Во-первых, резкий максимум сопротивления наблюдается в феврале, то есть задолго до того, как должен был бы наблюдаться максимальный уровень минерализации подземных вод. Во-вторых, в рамках этой модели совершенно необъясним августовский максимум сопротивления.

Таким образом, сезонные изменения сопротивления не могут быть объяснены в рамках модели, предполагающей увеличение или уменьшение минерализации воды, фильтрующейся через основание Хадумского купола из водохранилища.

Поэтому для объяснения причин наблюдаемых сезонных изменений кажущегося сопротивления необходимо рассматривать иные модели.

Анализ сезонных компонент R_k и приращений уровня воды в водохранилище

Весьма интересным и непонятным выглядит тот факт, что сопротивление очень хорошо согласуется (в противофазе) с изменениями уровня воды в водохранилище (рис. 4).

Регрессионная диаграмма двух этих параметров показана на рисунке 5.

Коэффициент корреляции достигает 0,90. Столь хорошее согласие между этими двумя параметрами трудно объяснить с позиций гидрологического эффекта, так как изменение уровня водохранилища определяется целой совокупностью факторов, каждый из которых должен влиять на сопротивление по-своему. Так, рост уровня

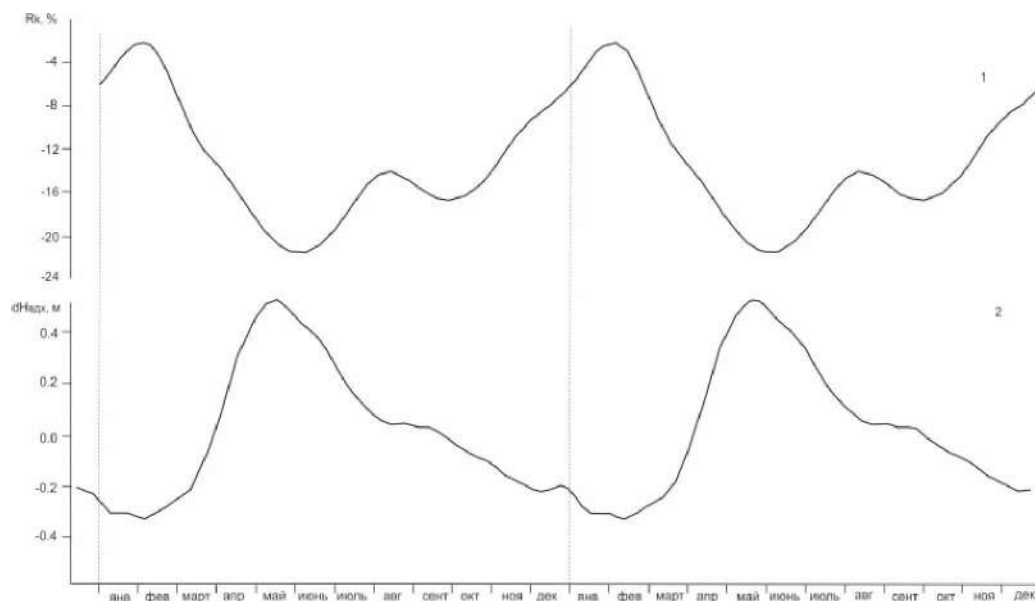


Рис. 4. Среднесезонные функции кажущегося сопротивления (1) и приращений уровня водохранилища (2) /

Fig. 4. Average seasonal function of apparent resistivity (1) and increments the level of the reservoir (2)

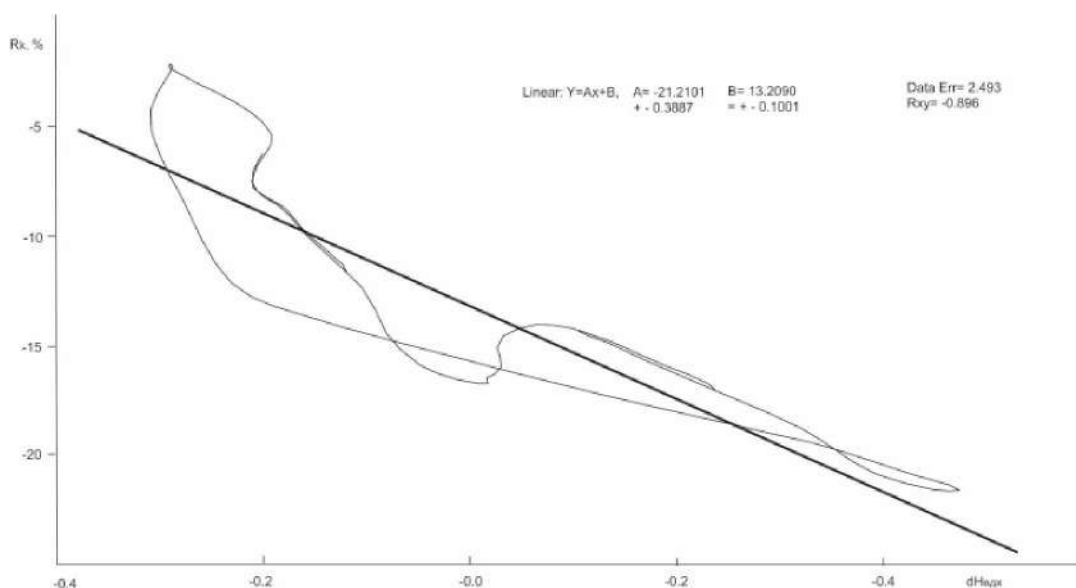


Рис. 5. Регрессионная диаграмма кажущегося сопротивления и приращений уровня водохранилища /

Fig. 5. Regression diagram of apparent resistance and reservoir level increments

связан в первую очередь с сильным притоком воды в водохранилище. Однако этот приток определяется преимущественно процессами в высокогорье (таяние снега и пр.), которые сами по себе никак не могут влиять на сопротивление в бесснежном среднегорном районе Хадумского купола. Уменьшение уровня связано с усиленной выработкой энергии на ГЭС, что обычно сопровождается увеличенным расходом воды в нижнем створе. Однако прямой связи между расходом воды (выработкой электроэнергии) и уровнем водохранилища, опять-таки, нет, поскольку уровень зависит не только от расхода воды, но и от ее притока. Так, летом выработка электро-

энергии близка к максимуму, но уровень не понижается, а сохраняет стабильность из-за высокого притока воды.

Обсуждение возможных механизмов связи, альтернативных гидрологическим

Помимо гидрогеологических механизмов могут быть рассмотрены деформационные, связанные с нагрузкой водохранилища. В районе Чиркейской ГЭС с 1976 г. 11 предприятием ГУГК велись наблюдения по изучению вертикальных движений, связанных с эксплуатационным режимом водохранилища. В работе [Дейнега, 1989] приводятся данные повторных нивелировок на трех точках. Для 1976 г. сезонные изменения нивелировок составили 20-26 мм; 1977-4-6 мм; 1978-3 мм. Из них видно, что процесс деформации происходил сложным образом. Максимальная деформация происходила в начальный период заполнения водохранилища с 1974 по 1976 гг. (изменение уровня около 200 м), а в последующие годы сезонные колебания составили 38-40 м и соответственно сезонные деформации были в разы меньше.

Деформационный механизм влияния сезонной нагрузки водохранилища на кажущееся сопротивление может быть представлен геоэлектрической моделью, когда между питающим и приемным диполями расположена субвертикальная трещинная зона, сопротивление которой контрастно отличается от сопротивления окружающих пород. Тогда от сжатия – растяжения вертикальных трещинных зон будет меняться площадь электрического контакта блоков, расположенных между измерительными диполями. При отсутствии воды в трещинах воздушные прослойки могут служить своего рода изоляторами, вызывающими значительные изменения кажущегося сопротивления с амплитудой среднесезонных вариаций до 18%.

Результаты моделирования такого процесса в электролитической ванне с непроводящим экраном, расположенным между диполями в крест оси зондирования для различных типов дипольных установок, показали, что чувствительность к «экрану» осевой установки в три раза больше, чем экваториальной [Идармачев, Алиев, 2013]. Нами для зондирования как раз применялась осевая установка, которая обладает максимальной чувствительностью к «экрану» (см. рис. 1).

Таким образом, результаты лабораторного моделирования подтверждают возможность деформационного механизма влияния сезонных колебаний уровня Чиркейского водохранилища на породы Хадумского купола. Однако возможны и другие альтернативные механизмы, например, гидрогеологические.

Выводы

1. Графики среднесезонных функций кажущегося сопротивления горных пород Хадумского купола и уровня воды в Чиркейском водохранилище имеют сложную форму и не позволяют объяснить связь в рамках фильтрационной модели, предполагающей увеличение или уменьшение обводненности пород в основании купола.

2. Для графиков кажущегося сопротивления горных пород и скорости изменения уровня воды в водохранилище коэффициент корреляции составляет 0,90, при этом связь не является случайной. Такую связь трудно объяснить фильтрационным эффектом, поэтому помимо гидрогеологических механизмов был предложен деформационный, связанный с нагрузкой водохранилища. В период быстрого роста уровня водохранилища в весенне-летнее время паводка рек дополнительная нагрузка приводит к деформации окружающих пород. Деформация вертикальных трещин,

расположенных между диполями, вызывает возникновение эффекта экранирования поля питающего диполя в результате проникновения в трещины атмосферного воздуха, который является изолятором. Механизм экранирования поля питающего диполя от приемного диполя подтверждается моделированием такого процесса в лабораторных условиях.

Литература

1. Даниялов М. Г., Левкович Р. А., Амиров К. Р. и др. Сейсмический мониторинг территории Дагестана (1998–2002). – Махачкала: Лика, 2003. – 177 с.
2. Дейнега Г. И. Влияние переменных нагрузок на динамику деформационных процессов и вертикальных смещений земной коры в связи с эксплуатацией Чиркейского водохранилища. // Сб. статей Ин-та геол. Дагестанского филиала АН СССР. Вопросы сейсмичности Восточного Предкавказья. – Махачкала. – 1989. – Вып. 40. – С. 51–58.
3. Дещеревский А. В., Сидорин А. Я. Некоторые вопросы методики оценки среднесезонных функций для геофизических данных. – М.: ОИФЗ РАН, 1999. – 40 с.
4. Дещеревский А. В., Журавлев В. И., Никольский А. Н., Сидорин А. Я. Проблемы анализа временных рядов с пропусками и методы их решения в программе WinABD. // Геофизические процессы и биосфера. – 2016. – Т. 15. № 3. – С. 5–34. DOI: 10.1134/S0001433817070027.
5. Дещеревский А. В., Журавлев В. И., Никольский А. Н., Сидорин А. Я. Анализ ритмов в экспериментальных сигналах. // Геофизические процессы и биосфера. – 2017. – Т. 16. № 2. – С. 55–73. DOI: 10.21455/GPB2017.2-2.
6. Дещеревский А. В., Модин И. Н., Сидорин А. Я. Сезонные вариации удельного электрического сопротивления в верхних слоях земной коры. // Вопросы инженерной сейсмологии. – 2018. – Т. 43. – № 3. – С. 68–83. DOI: 10.21455/VIS2018.3-6.
7. Идармачев И. Ш., Дещеревский А. В., Идармачев Ш. Г. Оценка связи между изменением уровня воды в Чиркейском водохранилище и электрическим сопротивлением пород правобережья плотины ГЭС. // Гидротехническое строительство. – 2019. – № 3. – С. 25–31.
8. Идармачев Ш. Г., Мусаев М. А., Идармачев И. Ш. Сейсмичность района Чиркейского водохранилища. // Геориск. – 2019. – Т. XIII. № 3. – С. 18–29. <https://doi.org/10.25296/1997-8669-2019-13-3-18-29>.
9. Идармачев Ш. Г., Алиев М. М. Вариации кажущегося электрического сопротивления горных пород в период Кизилюртовского землетрясения 1999 г. в Дагестане. // Геофизические исследования. – 2013. – Т. 14. № 2. – С. 15–24.
10. Черкашин В. И., Сабанаев К. А., Гаврилов Ю. О. Тектоническая карта Дагестана. – Махачкала: Изд. «Aleph», 2012. – 129 с.
11. Desherevskii A. V., Modin A. V., Sidorin A. Y. Seasonal Variations in Specific Resistivity in the Upper Layers of the Earth Crust. // Seism. Instr. – 2019. – Vol. 55. – No. 3. – pp. 300–312.
12. Desherevskii A. V., Modin A. V., Sidorin A. Y. Published in Engineering seismology issues. – 2018. – Vol. 43. – No. 3. – pp. 68–83. DOI: 10.3103/S0747923919030058
13. Descherevsky A. V., Lukk A. A., Sidorin A. Ya. Evidences of self-organization in geophysical fields' temporal variations. // Phys. Chem. Earth (A). – 2000. – Vol. 25. – No. 12. – pp. 775–779. DOI: 10.1016/S1464–1895 (01) 00004-7.
14. Descherevsky A. V., Lukk A. A., Sidorin A. Ya., Vstovsky G. V. and Timashev S. F. Flicker-noise spectroscopy in earthquake prediction research. // Natural Hazards and Earth System Sciences, EGU. – 2003. – Vol. 3. – No. 3. – pp. 159–164.
15. Descherevsky A. V., Sidorin A. Ya. Seasonal variations in natural processes and atmospheric precipitation. Annals of Geophysics. – 2004. – Vol. 47. No. 1. – pp. 73–81.
16. Fuye Q., Yulin Z., Tongchun X. An analysis of the seasonal variation of disturbance in georesistivity. // Acta seismologica Sinica. – 1988. – Vol. 1. No. 3. – pp. 69–83.
17. Gavrilov V. A., Pantelev I. A., Descherevskii A. V., Lander A. V., Morozova Yu. V.,

Buss Yu. Yu., Vlasov Yu. A. Stress – Strain State Monitoring of the Geological Medium Based on The Multi-instrumental Measurements in Boreholes: Experience of Research at the Petropavlovsk-Kamchatskii Geodynamic Testing Site (Kamchatka, Russia). // *Pure and Applied Geophysics*. – 2020. – Vol. 177 (1). – pp. 397-419. DOI: 10.1007/s00024-019-02311-3.

18. Honkura Y. Perturbation of the electric current by a resistivity anomaly and its application to earthquake prediction. // *J. Geomag. and Geoelectr.* – 1976. – Vol. 28. No. 1. – pp. 47-57.

19. Fitterman D. V., Madden T. R. Resistivity observations during creep events at Melendy Ranch, California. // *J. Geophys. Res.* – 1977. – Vol. 82. No. 33. – pp. 5401-5408.

20. Morrison H. F., Corwin R. F., Chung M. High-accuracy determination of temporal variations in crustal resistivity in earth's crust. // *Amer. Geophys. Union Monograph*. – 1977. – Vol. 20. – pp. 67-83.

21. Morrison H. F., Fernandez R., Corwin R. F. Earth resistivity, self-potential variations and earthquakes: a negative result for M-4.0. // *J. Geophys. Res. Lett.* – 1979. – Vol. 6. No. 3. – pp. 139-142.

22. Milne J. Earthquakes in connection with electric and magnetic phenomena. // *Trans. Seismol. Soc. Japan*. – 1980. – Vol. XV. – pp. 135-162.

23. Morrison H. F., Fernandez R. Temporal variations in the electrical resistivity of the Earth's crust. // *J. Geophys. Res.* – 1986. – Vol. 91. No. B-11. – pp. 618-628.

24. Panteleev I. A., Gavrilov V. A. Implications of electrokinetic processes for the intensity of geoacoustic emission in the time vicinity of a tectonic earthquake: A theoretical study. *Russian Journal of Earth Science*. – <https://doi.org/10.2205/2015ES000557>.

25. Qian J. Regional study of the anomalous change in apparent resistivity before the Tangshan earthquake (M=7.8, 1976) in China. // *Pure and Appl. Geophys.* – 1985. – Vol. 122. – pp. 901-910.

26. Savich A. I., Bronshtein V. I., Ilyin M. M., Laschenov S. Y., Stepanov V. V. Monitoring of regional and local geodynamic processes in areas of high dams in C.I. S. // *Proceedings of the Workshop: Geodynamical hazards associated with large dams, Conseil del'Europe*, Nov. 10-12, 1997. – Luxembourg. – 1998. – pp. 163-182.

References

1. Daniyalov M. G., Levkovich R. A., Amirov K. R. and others. Seismic monitoring of the territory of Dagestan (1998-2002). Makhachkala. Lika, 2003. 177 p. (In Russ.)

2. Deynaga G. I., Influence of variable loads on the dynamics of deformation processes and vertical displacements of the earth's crust in connection with the operation of the Chirkei reservoir. Collection of articles In-TA GEOL. Dagestan branch of the USSR Academy of Sciences. Questions of seismicity of the Eastern Caucasus. Makhachkala, 1989. Vol. 40. pp. 51-58. (In Russ.)

3. Descherevsky A. V., Sidorin A. Ya. Some problems of the method of estimating the average seasonal functions for geophysical data. Moscow. OIFZ RAS, 1999. 40 p. (In Russ.)

4. Descherevsky A. V., Zhuravlev V. I., Nikolsky A. N., Sidorin A. Ya. Problems in Analyzing Time Series with Gaps and Their Solution with the WinABD Software Package. *Izvestiya, Atmospheric and Oceanic Physics*, 2017. Vol. 53. No. 7. pp. 659-678. DOI: 10.1134/S0001433817070027. (In Russ.)

5. Descherevsky A. V., Zhuravlev V. I., Nikolsky A. N., Sidorin A. Ya. Analysis of Rhythms in Experimental Signals. *Izvestiya, Atmospheric and Oceanic Physics*, 2017. Vol. 53. No. 8. pp. 847-858. DOI: 10.1134/S0001433817080035. (In Russ.)

6. Descherevskii A. V., Modin A. V., Sidorin A. Y. Seasonal Variations in Specific Resistivity in the Upper Layers of the Earth Crust. *Seism. Instr.*, 2018. Vol. 43. No. 3. pp. 68-83. (In Russ.)

7. Idarmachev I. Sh., Descherevsky A. V., Idarmachev Sh. G. Assessment of the Relationship Between Water Level Changes in the Chirkei Reservoir and Electrical Resistivity of Rocks in the Right Bank Region of the Hydropower Plant Dam. *Power Technology and Engineering*. September 2019. Vol. 53. Issue 3. pp. 278-283. DOI: 10.1007/s10749-019-01071-3 (In Russ.)

9. Idarmachev I. S., Musayev M. A., Idarmachev S. G., The seismicity of the area of Chirkey reservoir. *Georisk*, 2019. Volume XIII. No 3. pp. 18-29. <https://doi.org/10.25296/1997-8669-2019-13-3-18-29> (In Russ.)
9. Idarmachev S. G., Aliev M. M., Variations of the apparent electrical resistance of rocks during the Kizilyurt earthquake of 1999 in Dagestan. *Geophysical survey*, 2013. Vol. 14. No. 2. pp. 15-24. (In Russ.)
10. Cherkashin V. I., Sabaneev K. A., Gavrilov Yu. O. Tectonic map of Dagestan. *Makhachkala*, 2012. 129 p. (In Russ.)
11. Desherevskii A. V., Modin A. V., Sidorin A. Y. Seasonal Variations in Specific Resistivity in the Upper Layers of the Earth Crust. *Seism. Instr.*, 2019. Vol. 55. No. 3. pp. 300-312.
12. Desherevskii A. V., Modin A. V., Sidorin A. Y. Published in Engineering seismology issues, 2018. Vol. 43. No. 3. pp. 68-83. DOI: 10.3103/S0747923919030058.
13. Descherevsky A. V., Lukk A. A., Sidorin A. Ya. Evidences of self-organization in geophysical fields temporal variations. *Phys. Chem. Earth (A)*, 2000. Vol. 25. No. 12. pp. 775-779. DOI: 10.1016/S1464-1895(01)00004-7.
14. Descherevsky A. V., Lukk A. A., Sidorin A. Ya., Vstovsky G. V., Timashev S. F. Flicker-noise spectroscopy in earthquake prediction research. *Natural Hazards and Earth System Sciences, EGU*, 2003. Vol. 3. No. 3. pp. 159-164.
15. Descherevsky A. V., Sidorin A. Ya. Seasonal variations in natural processes and atmospheric precipitation. *Annals of Geophysics*. 2004. Vol. 47. No. 1. pp. 73-81.
16. Fuye Q., Yulin Z., Tongchun X. An analysis of the seasonal variation of disturbance in georesistivity. *Actaseismologica Sinica*. 1988. Vol. 1. No. 3. pp. 69-83.
17. Gavrilov V. A., Panteleev I. A., Descherevskii A. V., Lander A. V., Morozova Yu. V., Buss Yu. Yu., Vlasov Yu. A. Stress – Strain State Monitoring of the Geological Medium Based on The Multi-instrumental Measurements in Boreholes: Experience of Research at the Petropavlovsk-Kamchatskii Geodynamic Testing Site (Kamchatka, Russia). *Pure and Applied Geophysics*, 2020. Vol. 177 (1). pp. 397-419. DOI: 10.1007/s00024-019-02311-3.
18. Honkura Y. Perturbation of the electric current by a resistivity anomaly and its application to earthquake prediction. *J. Geomag. and Geoelectr.* 1976. Vol. 28. No. 1. pp. 47-57.
19. Fitterman D. V., Madden T. R. Resistivity observations during creep events at Melendy Ranch, California. *J. Geophys. Res.* 1977. Vol. 82. No. 33. pp. 5401-5408.
20. Morrison H. F., Corwin R. F., Chung M. High-accuracy determination of temporal variations in crustal resistivity in earth's crust. *Amer. Geophys. Union Monograph*. 1977. Vol. 20. pp. 67-83.
21. Morrison H. F., Fernandez R., Corwin R. F. Earth resistivity, self-potential variations and earthquakes: a negative result for M-4.0. *J. Geophys. Res. Lett.* 1979. Vol. 6. No. 3. pp. 139-142.
22. Milne J. Earthquakes in connection with electric and magnetic phenomena. *Trans. Seismol. Soc. Japan*. 1980. Vol. XV. pp. 135-162.
23. Morrison H. F., Fernandez R. Temporal variations in the electrical resistivity of the Earth's crust. *J. Geophys. Res.* 1986. Vol. 91. No. B-11. pp. 618-628.
24. Panteleev I. A., Gavrilov V. A. Implications of electrokinetic processes for the intensity of geoacoustic emission in the time vicinity of a tectonic earthquake: A theoretical study. *Russian Journal of Earth Science*. <https://doi.org/10.2205/2015ES000557>.
25. Qian J. Regional study of the anomalous change in apparent resistivity before the tangshan earthquake (M=7.8, 1976) in China. *Pure and Appl. Geophys.* 1985. Vol. 122. pp. 901-910.
26. Savich A. I., Bronshtein V. I., Ilyin M. M., Laschenov S. Y., Stepanov V. V. Monitoring of regional and local geodynamic processes in areas of high dams in C. I. S. Proceedings of the Workshop: Geodynamical hazards associated with large dams, *Conseildel'Europe*, Nov. 10-12, 1997. Luxembourg. pp. 163-182.

УДК550.34

DOI: [10.46698/VNC.2020.64.38.007](https://doi.org/10.46698/VNC.2020.64.38.007)

Оригинальная статья

Макросейсмические и инструментальные исследования Верхне-Фиагдонского землетрясения 26 января 2020 года

И. Ю. Дмитриева^{id}, А. А. Саяпина^{id}, С. С. Багаева^{id}, С. В. Горожанцев^{id}

Северо-Осетинский филиал Федерального исследовательского центра «Единая геофизическая служба РАН», Россия, 362002, г. Владикавказ, ул. Маркова, д. 93а, e-mail: sofgras@gmail.com

Статья поступила: 16.09.2020, после рецензирования: 28.10.2020, принята к публикации: 12.11.2020

Резюме: Актуальность работы. Изучение землетрясений территории Северного Кавказа не просто актуальная задача. Ее решение является насущной необходимостью, требует ежедневного, кропотливого труда для повышения уровня комфортности жизни населения. **Целью работы** является представить достаточно подробный анализ ощутимого тектонического землетрясения, случившегося 26 января 2020 года в 21^h01^m по Гринвичу с интенсивностью сотрясений в эпицентре 4-5 баллов, произошедшего на территории Республики Северная Осетия-Алания. **Методы исследования** включали: определение параметров гипоцентра сейсмического события с помощью программно-вычислительных комплексах WSG и HYP071; описание геолого-тектонической позиции очага; расчет и графическое представление механизма очага землетрясения по знакам первых вступлений *P*-волн; сбор макросейсмических данных путем выездов на места проявления землетрясения для определения интенсивности сотрясений земной поверхности в баллах; рассмотрение исторической и современной сейсмичности в области исследуемого землетрясения. В **результате** получено следующее решение параметров гипоцентра землетрясения: $\varphi=42,69^{\circ}\text{N}$, $\lambda=44,15^{\circ}\text{E}$, $h=6$ км, $K_p=11,2$. Очаг землетрясения находился вблизи зоны возникновения очагов землетрясений (ВОЗ) Главного хребта в сеймотектоническом блоке, расположенном между Главным Кавказским и Адайком-Казбекским разломами. По знакам первых вступлений продольных *P*-волн на 20 станциях рассчитан механизм очага землетрясения. Согласно полученному решению очаг землетрясения возник в верхней части земной коры под действием сжимающих напряжений, тип движения – взбросо-сдвиг, что согласуется с кинематической характеристикой зоны Главного хребта. Землетрясение, получившее название Верхне-Фиагдонское, характеризуется отсутствием заметного афтершокового процесса, однако анализ имеющихся волновых форм ближайшей сейсмической станции показал наличие последовательности слабых сейсмических событий. Макросейсмический эффект землетрясения был исследован сотрудниками Северо-Осетинского филиала ФИЦ ЕГС РАН в 25 населенных пунктах. Согласно результатам опроса, максимальная интенсивность сотрясений составила 4-5 балла. По результатам оценки интенсивности построена соответствующая карта пунктов-баллов землетрясения. Приведены сведения по истории сейсмичности очаговой зоны исследуемого землетрясения за более чем 150 лет.

Ключевые слова: сейсмичность, землетрясение, эпицентр, механизм очага, макросейсмическое исследование.

Для цитирования: Дмитриева И. Ю., Саяпина А. А., Багаева С. С., Горожанцев С. В. Макросейсмические и инструментальные исследования Верхне-Фиагдонского землетрясения 26 января 2020 года. *Геология и геофизика Юга России*. 2020. 10 (4): 113 – 123. DOI: 10.46698/VNC.2020.64.38.007.

Благодарности: Работа выполнена при поддержке Минобрнауки РФ (в рамках государственного задания № 075-01304-20) и с использованием данных, полученных на уникальной научной установке «Сейсмоинфразвуковой комплекс мониторинга арктической криолитозоны и комплекс непрерывного сейсмического мониторинга Российской Федерации, сопредельных территорий и мира».

DOI: [10.46698/VNC.2020.64.38.007](https://doi.org/10.46698/VNC.2020.64.38.007)

Original paper

Macroseismic and instrumental studies of the Verkhniy Fiagdon earthquake on January 26, 2020

I. Yu. Dmitrieva^{id}, A. A. Sayapina^{id}, S. S. Bagaeva^{id}, S. V. Gorozhantsev^{id}

North Ossetia Regional Seismological Centre, Geophysical Survey,
Russian Academy of Sciences, 93a Markova Str., Vladikavkaz 362002,
Russian Federation, e-mail: sofgras@gmail.com

Received: 16.09.2020, revised: 28.10.2020, accepted: 12.11.2020

Abstract: Relevance. The earthquakes study in the North Caucasus is not just an urgent task. Its solution is an urgent need. It requires daily, painstaking work to increase the comfort level of the population's life. **The aim** of the work is to present a sufficiently detailed analysis of the tangible tectonic earthquake on January 26 at 21^h01^m GMT, which occurred on the territory of the Republic of North Ossetia-Alania. Intensity of the shock equaled 4-5 in the epicenter. **Research methods** included: determination of the parameters of the seismic event hypocenter using the WSG and HYP071 software complexes; description of the geological and tectonic position of the source; calculation and graphical presentation of the earthquake source mechanism by the signs of the first arrivals of P-waves; collection of macroseismic data by visits to the places of earthquake manifestation to determine the intensity of shaking the earth's surface in points; consideration of historical and modern seismicity in the area of the investigated earthquake. **As a result**, the following solution of parameters of an earthquake is received: $\varphi=42,69^{\circ}\text{N}$, $\lambda=44,15^{\circ}\text{E}$, $h=6$ km, $K_p=11,2$. The epicenter of the earthquake occurs near the Main ridge zone. In more detail, the earthquake happened in the seismotectonic block located between the Main Caucasian and Adaykom-Kazbek faults. For the earthquake, the mechanism of the focus was calculated according to the signs of the first arrivals of longitudinal P-waves at 20 stations. According to the solution, the earthquake occurred in the upper part of the earth's crust under the action of compressive stresses, the type of motion is upthrust-strike-slip, which is consistent with the kinematic characteristic of the Main Ridge Zone. The earthquake, called Verkhniy Fiagdon earthquake, is characterized by the absence of a noticeable aftershock process, but the analysis of the available wave forms of the nearest seismic station showed the presence of a sequence of weak seismic events. The macroseismic effect of the earthquake was investigated in 25 settlements by the staff of the North Ossetian branch of the Geophysical Survey of the Russian Academy of Sciences. According to the survey results, the maximum intensity of concussions was 4-5 points. A map of earthquake manifestations in localities constructed based on the results of the intensity assessment. The history of seismicity of the focal zone of the investigated earthquake for the last 150 years is studied.

Keywords: seismicity, earthquake, epicenter, focal mechanism, macroseismic research.

For citation: Dmitrieva I. Yu., Sayapina A. A., Bagaeva S. S., Gorozhantsev S. V. Macroseismic and instrumental studies of the Verkhniy Fiagdon earthquake on January 26, 2020. *Geologiya i Geofizika Yuga Rossii = Geology and Geophysics of Russian South*. (in Russ.). 2020. 10 (4): 113 – 123. DOI: 10.46698/VNC.2020.64.38.007.

Acknowledgments: This work was supported by the Ministry of Education and Science of the Russian Federation (within the framework of state assignment No. 075-01304-20) and using data obtained at the unique scientific equipment "Seismic-infrasound complex for monitoring the Arctic permafrost and a complex for continuous seismic monitoring of the Russian Federation, adjacent territories and the world".

Введение

Северный Кавказ является одним из наиболее опасных регионов Российской Федерации [Ulomov et al., 2007; Lukk, Shevchenko, 2019]. Согласно карте ОСР-2016, здесь возможны разрушительные землетрясения с интенсивностью до 8-9 баллов по шкале MSK-64. Следовательно, глубокое изучение сейсмичности данной территории – это не просто актуальная задача, а острая проблема, требующая ежедневного кропотливого труда для повышения безопасности жизни населения.

26 января 2020 года в горной местности на юге Республики Северная Осетия-Алания в 20 км от села Верхний Фиагдон и в 9 км от Российско-Грузинской границы произошло ощутимое землетрясение с энергетическим классом $K_p=11,2$ и максимальной интенсивностью в эпицентре 4-5 баллов. Оно стало сильнейшим инструментально зарегистрированным землетрясением с момента создания на территории республики сети сейсмологических наблюдений [Габсатарова и др., 2014; Багаева и др., 2016; Багаева и др., 2019]. В тектоническом отношении эпицентр Верхне-Фиагдонского землетрясения находился в блоке между Адайком-Казбекским разломом на севере и Тибским разломом на юге, которые круто падают к северу и северо-востоку соответственно. Смещения по обоим разломам – взбросо-надвиги. Ранее в зоне Тибского разлома была выявлена Нарская зона первичных палеосейсмодислокаций, тяготеющая к одноименной неотектонической депрессии, что свидетельствует о современной сейсмотектонической активности этой структуры [Рогожин и др., 2014].

Цель работы

Целью настоящей работы являлось проведение комплексного анализа основных параметров очага землетрясения на основе инструментальных и макросейсмических данных, определение его расположения в сейсмотектоническом плане территории Северной Осетии-Алании, построение механизма очага для сопоставления полученного решения с кинематикой разломной структуры очаговой зоны исследуемого землетрясения.

Методы и результаты исследования

Методика исследований Верхне-Фиагдонского землетрясения включала: оценку и обработку инструментальных данных, расчет и графическое представление механизма очага, сбор и анализ макросейсмических данных, обзор исторической и современной сейсмичности.

Инструментальные данные

Параметры гипоцентра землетрясения, рассчитанные в программно-вычислительных комплексах WSG [Красилов и др., 2006] и HYPO71 [Lee et al., 1985], были определены по данным сетей сейсмических станций NOGSR, OBGR и DAGSR [Габсатарова и др., 2017]. Получено следующее решение параметров очага землетрясения: $\varphi=42,69^\circ\text{N}$, $\lambda=44,15^\circ\text{E}$, $h=6$ км, $K_p=11,2$. Станции [Погода и др., 2016; Саяпина и др., 2019], участвующие в определении параметров гипоцентра, окружали эпицентр с азимутальной брешью $\text{GAP}=160^\circ$. Ближайшая станция «Лац» находилась на расстоянии 21 км. Общее число станций, участвующих в локации, равно $N=20$. Записи ближайших к эпицентру станций представлены на рисунке 1.

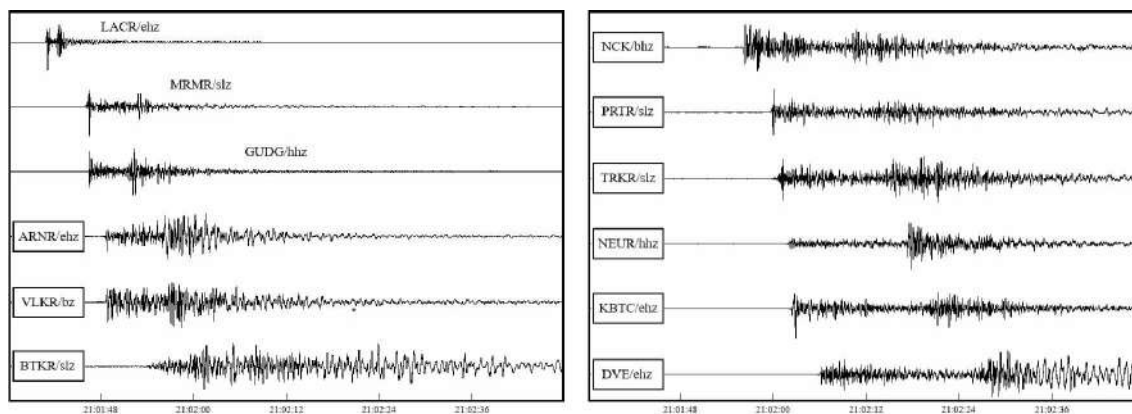


Рис. 1. Записи землетрясения 26.01.2020 г. в 21^h01^m с $K_p=11,2$. /
Fig. 1. Records of the earthquake of 26.01.2020 at 21^h01^m with $K_p=11,2$.

За основным толчком не последовало заметного афтершокового процесса, однако, проанализировав недельную запись вертикальной компоненты ближайшей сейсмической станции «Лац», удалось выделить последовательность слабых сейсмических событий. При ближайшем рассмотрении записи 21 событие было отнесено к событиям «возможно, афтершок» (рис. 2). Распределение их во времени изображено на рисунке 3.

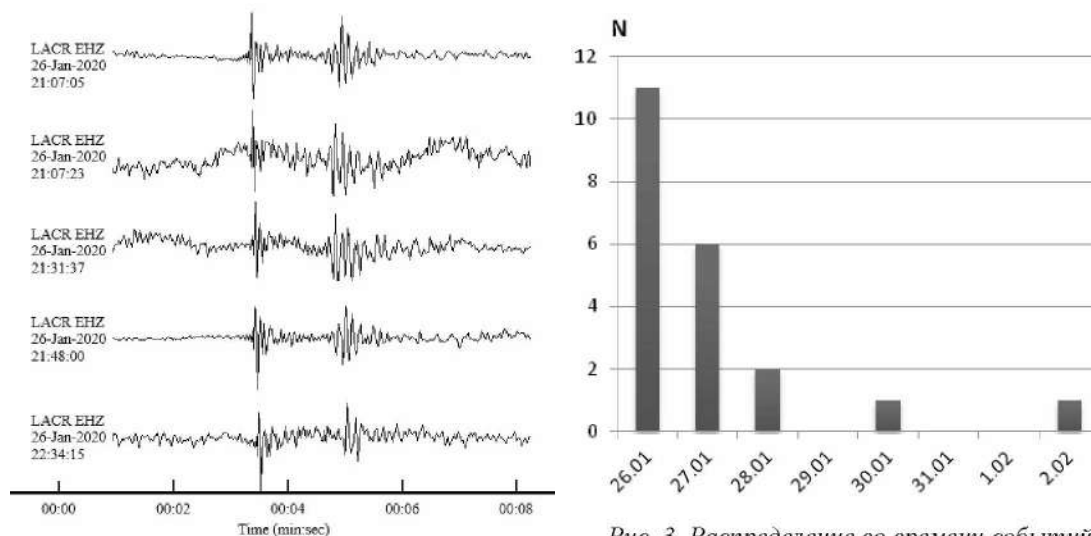


Рис. 2. Записи событий «возможно, афтершок». /
Fig. 2. Records of «possible aftershock» events.

Рис. 3. Распределение во времени событий «возможно, афтершок». /
Fig. 3. The distribution in time of events «possible aftershock».

Механизм очага

Механизм очага Верхне-Фиагдонского землетрясения (табл. 1, рис. 4) рассчитан по знакам первых вступлений продольных волн [Ландер, 2006] на 20 станциях, расположенных на расстояниях от 21 до 211 км от эпицентра.

Согласно полученному решению землетрясение возникло под действием преобладающих сжимающих напряжений, ориентированных в северо-западном направлении. Тип подвижки в очаге соответствовал взбросу с правосторонним сдвигом по плоскости NP1, простирающейся с юго-запада на северо-восток, и левостороннему сдвигу с взбросовой компонентой по плоскости NP2 близ меридианального простираения.

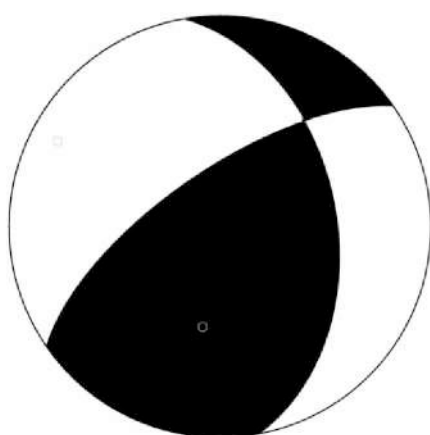


Рис. 4. Стереограмма механизма очага землетрясения 26 января 2020 г. /

Fig. 4. Stereogram of the focal mechanism of the earthquake on January 26, 2020

Обе нодальные плоскости имеют достаточно крутое падение ($DP=44-69^\circ$).

Такое решение механизма очага хорошо сочетается с кинематической характеристикой зоны Главного хребта ВОЗ. Простираение плоскости $NP1$ согласуется с вытянутостью изосейст, что позволяет выбрать ее в качестве действующей плоскости.

Макросейсмические данные

Для сбора макросейсмических данных сотрудниками Северо-Осетинского филиала ФИЦ ЕГС РАН был осуществлен выезд в эпицентральною зону и близлежащие районы. Также сведения о макросейсмических проявлениях из 14 населенных пунктов были собраны путем телефонного опроса. Оценка

интенсивности проводилась по реакции людей и предметов быта на основе шкалы ШСИ-17 [ГОСТ Р 57546-2017], являющейся результатом модернизации шкал MSK-64 [Медведев и др., 1965], MCS [Sieberg, 1923], MM [Wood et al., 1931], EMS-98 [European Macroseismic Scale, 1998], ESI-2007 [Michetti et al., 2007].

С интенсивностью 4-5 баллов землетрясение проявилось в населенных пунктах Хидикус, Лац, Урикау, Верхний Фиагдон и Верхний Унал и было замечено практически всеми жителями этих сел. Многие люди испытывали сильный испуг и покидали помещения, многие спящие просыпались. В домах сильно раскачивались висячие предметы, дребезжала посуда, скрипела и дрожала мебель, в некоторых случаях падали иконы, беспокоились домашние животные. При землетрясении был слышен грохотообразный гул, похожий на взрыв.

Интенсивность колебаний 4 балла была зафиксирована в населенных пунктах Дзивгис, Нар, Бурон и Верхний Цей. Здесь землетрясение ощутили многие люди, находящиеся в покое. В помещениях дрожала мебель, колебались свободно подвешенные предметы. Люди слышали сильный шум как при грозе. Паники у людей не было.

В Тамиске и Кобане ощутимость землетрясения составила 3 балла. Люди, находившиеся в покое, испытывали плавное покачивание. В домах были заметны колебания висячих предметов, дребезжание посуды.

Таблица 1 / Table 1

Параметры механизма очага землетрясения 26 января 2020 г. /
The parameters of the focal mechanism of the earthquake of January 26, 2020

Оси главных напряжений / Principal axes						Нодальные плоскости / Nodal planes					
T		P		N		$NP1$			$NP2$		
PL	AZM	PL	AZM	PL	AZM	STK	DP	$SLIP$	STK	DP	$SLIP$
50	190	14	298	36	39	235	69	129	349	44	32

Интенсивность сотрясений в 2-3 балла зафиксирована в населенных пунктах Алагир, Суадаг и Чми. Люди ощущали плавное покачивание, в домах слегка покачивались люстры. В селении Чми у людей возникло ощущение того, как будто Терек вышел из берегов (у тех, кто уже сталкивался с этим явлением).

2 балла отмечены в населенных пунктах Балта и Ногкау по единичным слабым ощущениям.

Во Владикавказе и Ардоне землетрясение ощущалось на верхних этажах многоэтажных зданий.

Обобщенные результаты оценки интенсивности землетрясения приведены в таблице 2, а соответствующая карта пунктов-баллов представлена на рисунке 5.

Историческая и современная сейсмичность

Очаг исследуемого землетрясения расположен вблизи зоны Главного хребта ВОЗ [Рогожин и др., 2008], для которой теоретически максимально возможная маг-

Таблица 2 / Table 2

**Макросейсмические данные о землетрясении 26 января 2020 г. /
Macro seismic data on the earthquake on January 26, 2020**

№	Пункт / Settlement	Δ, км / km	Координаты / Coordinates	
			φ°, N	λ°, E
	4-5 балла / 4-5 points			
1	Хидикус / Hidikus	18,6	42,82	44,27
2	Лац / Lats	20	42,82	44,29
3	Урикау / Urikau	20,1	42,83	44,29
4	В. Фиэгдон / Upper Fiagdon	21,4	42,83	44,31
5	В. Унал / Upper Unal	18,5	42,85	44,16
	4 балла / 4 points			
6	Дзивгис / Dzivgis	25,6	42,88	44,31
7	Нар / Nar	10,5	42,68	44,02
8	Бурон / Buron	17,2	42,79	44,01
9	В. Цей / Upper Tsey	22,1	42,80	43,94
	3 балла / 3 points			
10	Тамиск / Tamisk	31,5	42,96	44,20
11	Кобан / Koban	37,6	42,92	44,48
	2-3 балла / 2-3 points			
12	Алагир / Alagir	40,6	43,04	44,22
13	Суадаг / Suadag	41,5	43,04	44,28
14	Чми / Chmi	44,2	42,85	44,64
	2 балла / 2 points			
15	Дзуарикау / Dzuarikau	43	43,02	44,41
15	Балта / Balta	47,2	42,92	44,63
16	Ногкау / Nogkau	47,6	43,09	44,29
	1 балл / 1 point			
17	Ардон / Ardon	56,3	43,18	44,30
18	Владикавказ / Vladikavkaz	57,7	43,02	44,68
	не ощущалось / not feel			
19	В. Саниба / Upper Saniba	49,3	43,01	44,56
20	Н. Саниба / Lower Saniba	50,7	43,04	44,54
21	Кадгарон / Kadgaron	52,1	43,13	44,33
22	Гизель / Gizel	52,9	43,04	44,57
23	Архонская / Arkhonskaya	56,1	43,11	44,51
24	Фарн / Farn	62,7	43,18	44,50
25	Октябрьское / Oktyabrskoe	64,3	43,06	44,75

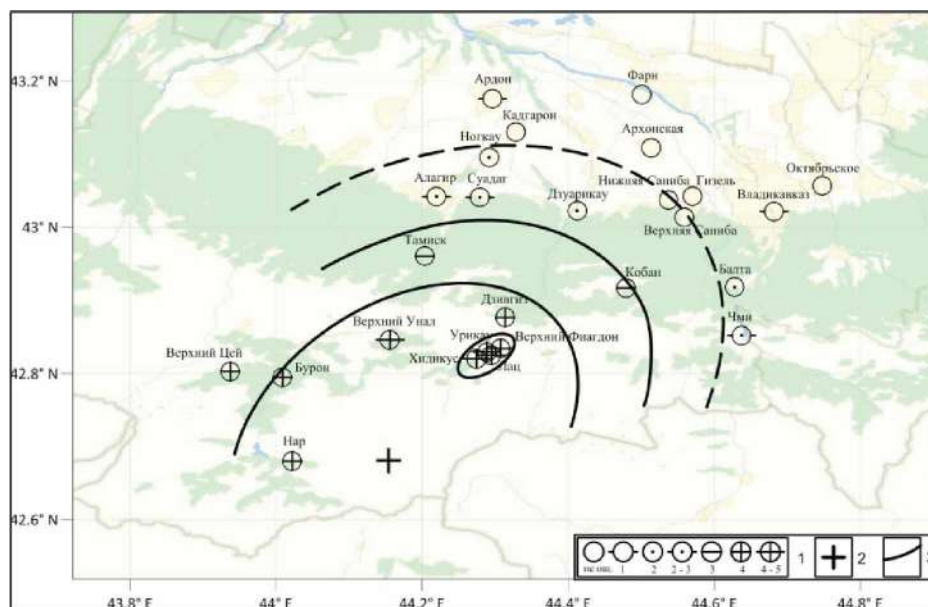


Рис. 5. Карта пунктов-баллов и фрагменты предполагаемых изосейст землетрясения 26 января 2020 г. с $K_p=11,2$

1 – интенсивность сотрясений в баллах по шкале ШСН-17; 2 – эпицентр, определенный по инструментальным данным; 3 – предполагаемые изосейсты. /

Fig. 5. Map locality-points and fragments of the expected isoseist earthquake January 26, 2020 with $K_p=11,2$

1 – macroseismic intensity; 2 – instrumental epicenter; 3 – supposed isoseists.

Таблица 3 / Table 3

Основные параметры сильнейших исторических землетрясений в районе Верхне-Фиэгдонского землетрясения. / The main parameters of the strongest historical earthquakes in the area of the Verkhniy Fiagdon Earthquake

№	Дата / Date	Время / Time	Эпицентр / Epicenter		h , км / km	M	I_0 , баллы / points
			φ° , N	λ° , E			
1	13.03.1854	07:45 ± 10 мин	42,80 $\pm 0,5$	44,00 $\pm 0,5$	15 5-50	4,4 $\pm 0,7$	5-6 ± 1
2	30.08.1905	23:54:16 ± 10 с	42,70 $\pm 0,2$	44,00 $\pm 0,2$	11 5-22	4,2 $\pm 0,5$	6 $\pm 0,5$
3	17.02.1917	23:49 ± 10 мин	42,7 $\pm 0,2$	44,0 $\pm 0,2$	(10) 3-30	4,2 $\pm 0,7$	6 ± 1
4	22.02.1917	04:58:22 ± 10 с	42,7 $\pm 0,2$	44,0 $\pm 0,2$	9 4-18	4,5 $\pm 0,5$	6-7 ± 1
5	09.05.1946	19:49:08 ± 5 с	42,7 $\pm 0,2$	44,4 $\pm 0,2$	20 13-30	4,8 $\pm 0,5$	6 $\pm 0,5$
6	06.11.1946	21:54:07 ± 5 с	42,6 $\pm 0,2$	44,5 $\pm 0,2$	16 8-32	3,9 $\pm 0,7$	5 ± 1
7	29.04.1991	09:37	42,84	44,12	10	5,1	
8	29.04.1991	19:06	42,65	44,02	2	4,8	
9	11.02.1994	17:40	42,68	44,08	10	3,8	

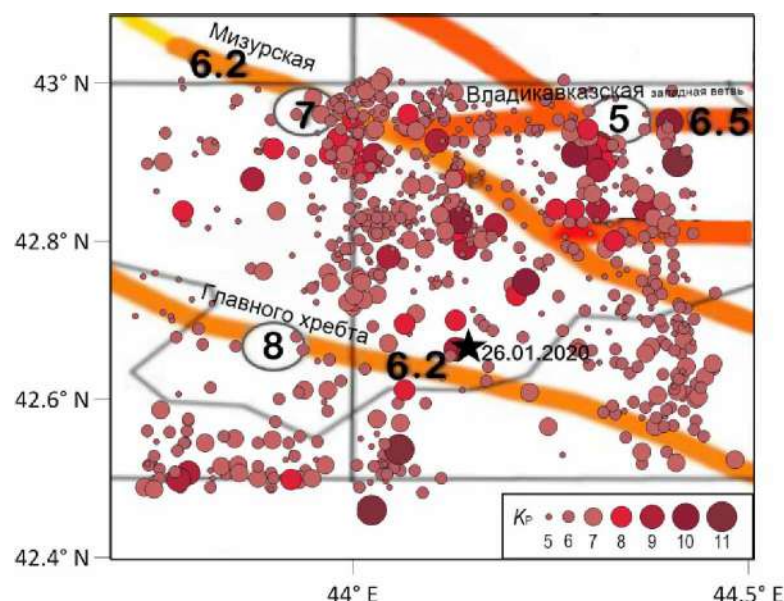


Рис. 6. Сейсмичность вблизи эпицентральной зоны Верхне-Фиагдонского землетрясения 2004-2019 гг. на фоне зон ВОЗ. /

Fig. 6. Seismicity near the epicentral zone of the Verkhniy Fiagdon earthquake of 2004-2019 against the background of the zones of possible earthquake foci.

нитуа равна $M_{\max}=6,2$. По данным [Бабаян и др., 1977; Годзиковская, 2001] была рассмотрена история сейсмичности очаговой зоны Верхне-Фиагдонского землетрясения за последние 150 лет. Параметры ближайших по расстоянию к нему сильнейших и ощутимых землетрясений приведены в таблице 3.

Сейсмичность вблизи эпицентра Верхне-Фиагдонского землетрясения в 2004-2019 гг. показана на рисунке 6 на фоне карты зон ВОЗ Мизурской (7), Владикавказской (5), Главного Хребта (8). Цифрами 6,2 и 6,5 отмечены максимально возможные магнитуды. Как видно, зона Главного хребта на территории Северной Осетии-Алании наименее сейсмоактивна, несмотря на высокий сейсмический потенциал.

Заключение

Верхне-Фиагдонское землетрясение стало сильнейшим инструментально зарегистрированным землетрясением с момента создания на территории республики сети сейсмологических наблюдений. Оно подтвердило значительный сейсмический потенциал зоны Главного хребта ВОЗ. Решение механизма очага хорошо согласуется с кинематикой разломной структуры очаговой зоны исследуемого землетрясения. Макросейсмический эффект Верхне-Фиагдонского землетрясения проанализирован на основе шкалы ШСИ-17. В результате анализа построена соответствующая карта пунктов-баллов, свидетельствующая о преобладании распространения сотрясений в северо-восточном направлении.

Проведенные исследования находят свое применение в решении различных научных и практических задач.

Литература

1. Бабаян Т. О., Кулиев Ф. Т., Папалашвили В. Г., Шебалин Н. В., Вандышева Н. В. (отв. сост.). П б. Кавказ [50-1974 гг., $M \geq 4,0$, $I_0 \geq 5$]. // Новый каталог сильных землетрясений на территории СССР с древнейших времен до 1975 г. – М.: Наука, 1977. – С. 69-170.

2. Багаева С. С., Саяпина А. А., Горожанцев С. В. О современной сейсмичности Республики Северная Осетия-Алания по данным инструментальных наблюдений СОФ ФИЦ ЕГС РАН. // Опасные природные и техногенные процессы в горных регионах: модели, системы, технологии. Коллективная монография. / Под ред. А. В. Николаева, В. Б. Заалишвили. – Владикавказ: ГФИ ВНЦ РАН, 2019. – С. 502-508.
3. Габсатарова И.П., Погода Э.В., Головкова Л.В. Хаталдонское землетрясение 11 мая 2008 года с $K_p = 10,2$, $I_0 = 4$ (Северная Осетия-Алания). // Землетрясения Северной Евразии в 2008 году. – Обнинск: ФИЦ ЕГС РАН, 2014. – С. 330–336.
4. Габсатарова И. П., Даниялов М. Г., Мехрюшев Д. Ю., Погода Э. В., Янков А. Ю. Северный Кавказ. // Землетрясения России в 2015 году. – Обнинск: ФИЦ ЕГС РАН, 2017. – С. 17-27.
5. Годзиковская А. А. База данных «Каталог землетрясений Кавказа с $M \geq 4,0$ ($K \geq 11,0$) с древнейших времен по 2000 г.» [электронный ресурс]. – URL: <http://zeus.wdcb.ru/wdcb/sep/caucasus/>.
6. ГОСТ Р 57546-2017 Землетрясения. Шкала сейсмической интенсивности. – М.: Стандартинформ, 2017. – 27 с.
7. Красилов С. А., Коломиец М. В., Акимов А. П. Организация процесса обработки цифровых сейсмических данных с использованием программного комплекса WSG. // Современные методы обработки и интерпретации сейсмологических данных. Материалы Международной сейсмологической школы, посвященной 100-летию открытия сейсмических станций «Пулково» и «Екатеринбург». Петергоф, 2-6 октября 2006 г. – Обнинск: ГС РАН, 2006. – С. 77-83.
8. Ландер А. В. Описание и инструкция для пользователя комплекса программ FA (расчет и графическое представление механизмов очагов землетрясений по знакам первых вступлений P -волн). – М.: Фонды автора, 2006. – 27с.
9. Медведев С. В., Шпонхойер В., Карник В. Шкала сейсмической интенсивности MSK-64. // М.: Межведомственный геофизический институт при Президиуме АН СССР, 1965. – 11с.
10. Погода Э. В., Дмитриева И. Ю., Пятунин М. С. Исследование спектральных характеристик сейсмических шумов на сеймостанциях Республики Северная Осетия-Алания. // Современные методы обработки и интерпретации сейсмологических данных. Материалы XI Международной сейсмологической школы. / Отв. ред. А. А. Маловичко. – Обнинск: ФИЦ ЕГС РАН, 2016. – С. 263-267.
11. Рогожин Е. А., Габсатарова И. П., Погода Э. В. Зоны ВОЗ и сейсмичность территории Республики Северная Осетия-Алания. // Землетрясения Северной Евразии. Материалы Международной конференции, посвященной 10-летию выпуска сборника научных трудов «Землетрясения Северной Евразии», Обнинск, 28-31 июля 2008 г. – Обнинск: ГС РАН, 2008. – С. 243-249.
12. Рогожин Е. А., Овсяченко А. Н., Лутиков А. И., Собисевич А. Л., Собисевич Л. Е., Горбатилов А. В. Эндогенные опасности Большого Кавказа. – М.: ИФЗ РАН, 2014. – 256 с.
13. Саяпина А. А., Багаева С. С., Горожанцев С. В. Краткая история создания и этапы развития сейсмологической службы в Республике Северная Осетия-Алания (к 80-летию Э. В. Погоды и 20-летию образования СОФ ФИЦ ЕГС РАН). // Вестник Владикавказского научного центра. – 2019. – Т. 19. № 2. – С. 56-64.
14. European Macroseismic Scale EMS-98. / Ed. by G. Grunthal. Luxembourg: Cahiers du Centre Europeen de Geodynamique et de Seismologie. – 1998. – Vol. 15. – 99 p.
15. Lee W. H. K. and Valdes C. M. HYP071PC: A personal computer version of the HYP071 earthquake location program. // U. S. Geological Survey Open File Report 85-749. – 1985. – 43 p.
16. Lukk A. A., Shevchenko V. I. Seismicity, tectonics, and GPS geodynamics of the Caucasus. // Izvestiya. Physics of the Solid Earth. – 2019. – Vol. 55. No. 4. – pp. 626-648.
17. Michetti A. M., Esposito E., Guerrieri L., Porfido S., Serva L., Tatevossian R., Vittori E., Audernard F., Azuma T., Clague J., Commerci V., Gurbinar A., McCalpin J., Mohammadioun B.,

Morner N. A., Ota Y., Rogozhin E. Intensity scale ESI 2007. // *Memorie descriptive della cartageologica d'Italia*. – 2007. – Vol. LXXIV. – 50 p.

18. Sieberg A. *Geologische, physikalische und angewandte Erdbebenkunde*. – Jena: G. Fischer, 1923.

19. Ulomov V. I., Danilova T. I., Medvedeva N. S., Polyakova T. P., Shumilina L. S. Assessment of seismic hazard in the North Caucasus. // *Izvestiya. Physics of the Solid Earth*. – 2007. – Vol. 43, No. 7. – pp. 559-572.

20. Wood H., Neumann F. Modified Mercalli intensity scale of 1931. // *Bull. Seismol. Soc. Am.* – 1931. – Vol. 21. – pp. 277-283.

References

1. Babayan T. O., Kuliev F. T., Papalashvili V. G., Shebalin N. V., Vandysheva N. V. *Iib. Caucasus [50-1974, $M \geq 4.0$, $I_0 \geq 5$]. New catalog of strong earthquakes on the territory of the USSR from ancient times to 1975*. Moscow, Nauka, 1977. pp. 69-170. (In Russ.)

2. Bagaeva S. S., Sayapina A. A., Gorozhantsev S. V. On the modern seismicity of the Republic of North Ossetia-Alania according to instrumental observations of the FRC GS RAS. Hazardous natural and man-made processes in mountainous regions: models, systems, technology. Collective monograph. Vladikavkaz, GPI VSC RAS, 2019. pp. 502-508. (In Russ.)

3. Gabsatarova I. P., Pogoda E. V., Golovkova L. V. Hataldonsk earthquake on May 11, 2008 with $K_p = 10,2$, $I_0 = 4$ (North Ossetia-Alania). The earthquakes of Northern Eurasia, 2008. Obninsk, GS RAS, 2014. pp. 330-336. (In Russ.)

4. Gabsatarova I. P., Daniyalov M. G., Mekhryushev D. Yu., Pogoda E. V., Yankov A. Yu. North Caucasus. Earthquakes in Russia in 2015. Obninsk, FRC GS RAS, 2017. pp. 17-27. (In Russ.)

5. Godzikovskaya A. A. Database “Catalog of earthquakes of the Caucasus with $M \geq 4.0$ ($K \geq 11.0$) from ancient times to 2000” URL: <http://zeus.wdcb.ru/wdcb/sep/caucasus/>. (In Russ.)

6. GOST R 57546-2017 Earthquakes. Seismic intensity scale. Moscow, Standartinform, 2017. 27 p. (In Russ.)

7. Krasilov S. A., Kolomiets M. V., Akimov A. P. Organization of digital seismic data processing using the WSG software package. Modern methods of processing and interpretation of seismological data. In: Proceedings of the International Seismological School dedicated to the 100th anniversary of the opening of the seismic stations “Pulkovo” and “Yekaterinburg”. Peterhof, October 2-6, 2006, Obninsk, GS RAS, 2006. pp. 77-83. (In Russ.)

8. Lander A. V. Description and instructions for the user of the FA software package (calculation and graphical presentation of earthquake source mechanisms by the signs of the first arrivals of P-waves). Moscow, 2006. 27p. (In Russ.)

9. Medvedev S. V., Shponkhoier V., Karnik V. Scale of seismic intensity MSK-64. Moscow. Interdepartmental Geophysical Institute under the Presidium of the USSR Academy of Sciences, 1965. 11 p. (In Russ.)

10. Pogoda E. V., Dmitrieva I. Yu., Pyatunin M. S. Study of the spectral characteristics of seismic noise at seismic stations in the Republic of North Ossetia-Alania. Modern methods of processing and interpretation of seismological data. In: Proceedings of the XI International Seismological School. Obninsk, FRC GS RAS, 2016. pp. 263-267. (In Russ.)

11. Rogozhin E. A., Gabsatarova I. P., Pogoda E. V. PSS zones and seismicity of the territory of the Republic of North Ossetia-Alania. Earthquakes of Northern Eurasia. In: Proceedings of the International Conference dedicated to the 10th anniversary of the release of the proceedings of scientific papers “Earthquakes of Northern Eurasia”, Obninsk, July 28-31, 2008, Obninsk, GS RAS, 2008. pp. 243-249. (In Russ.)

12. Rogozhin E. A., Ovsyuchenko A. N., Lutikov A. I., Sobisevich A. L., Sobisevich L. E., Gorbaticov A. V. Endogenous hazards of the Greater Caucasus. Moscow. IPE RAS, 2014. 256 p. (In Russ.)

13. Sayapina A. A., Bagaeva S. S., Gorozhantsev S. V. A brief history of the creation and stages of development of the seismological service in the Republic of North Ossetia-Alania (to the 80th anniversary of E. V. Pogoda and the 20th anniversary of the establishment of the NOB of FRC EGS RAS). *Bulletin of the Vladikavkaz Scientific Center*, 2019. Vol. 19. No. 2. pp. 56-64. (In Russ.)
14. European Macroseismic Scale EMS-98. Ed. by G. Grunthal. Luxembourg: Cahiers du Centre Europeen de Geodynamique et de Seismologie, 1998. Vol. 15. 99 p.
15. Lee W. H. K. and Valdes C. M. HYP071PC: A personal computer version of the HYP071 earthquake location program. U. S. Geological Survey Open File Report, 1985. 43 p.
16. Lukk A. A., Shevchenko V. I. Seismicity, tectonics, and GPS geodynamics of the Caucasus. *Izvestiya. Physics of the Solid Earth*, 2019. Vol. 55. No. 4. pp. 626-648.
17. Michetti A. M., Esposito E., Guerrieri L., Porfido S., Serva L., Tatevossian R., Vittori E., Audermard F., Azuma T., Clague J., Commerci V., Gurpinar A., McCalpin J., Mohammadioun B., Morner N. A., Ota Y., Rogozhin E. Intensity scale ESI 2007. *Memorie descrittive della cartageologica d'Italia*, 2007. Vol. LXXIV. 50 p.
18. Sieberg A. *Geologische, physikalische und angewandte Erdbebenkunde*. Jena, G. Fischer, 1923.
19. Ulomov V. I., Danilova T. I., Medvedeva N. S., Polyakova T. P., Shumilina L. S. Assessment of seismic hazard in the North Caucasus. *Izvestiya. Physics of the Solid Earth*, 2007. Vol. 43. No. 7. pp. 559-572.
20. Wood H., Neumann F. Modified Mercalli intensity scale of 1931. *Bull. Seismol. Soc. Am.*, 1931. Vol. 21. pp. 277-283.

ГЕОЛОГИЯ, ПОИСКИ И РАЗВЕДКА ТВЕРДЫХ
ПОЛЕЗНЫХ ИСКОПАЕМЫХ, МИНЕРАГЕНИЯ

УДК 552.2

DOI: [10.46698/VNC.2020.48.31.008](https://doi.org/10.46698/VNC.2020.48.31.008)

Оригинальная статья

Состав и реконструкция источников
сноса терригенных отложений
на северо-западе ЮАРБ. Л. Пхарое ^{1, 2}, А. Н. Евдокимов ¹¹Санкт-Петербургский горный университет, 199106, Санкт-Петербург, Васильевский остров, 21 линия, д. 2, e-mail: benedictpharoe1@gmail.com;²Совет по наукам о земле, государственная геологическая служба, Претория 0001, Южно-Африканская Республика, e-mail: evdokimov48@list.ru

Статья поступила: 21.10.2020, после рецензирования: 16.11.2020, принята к публикации: 30.11.2020

Резюме: Актуальность работы. Северо-западный регион ЮАР до недавнего времени не являлся промышленно марганценосным. Однако результаты изучения последних лет дают основание думать, что здесь могут быть залежи марганцевых руд. Марганцевое оруденение в этом регионе встречается в виде марганцевых конкреций, порошкообразного марганцевого вада и марганцевых корок в коре выветривания. Марганцевые конкреции приурочены к аллювиальной части «Westwits alluvium» рудного разреза и марганцевый вад накапливался в карстовых структурах, образовавшихся в результате приповерхностного выветривания, выщелачивания и растворения подстилающих марганценосных неоархейских доломитов. Предполагается два потенциальных источника марганца: первый расположен непосредственно под рудным телом, а второй – на существенном удалении от него. Если первый источник рудного вещества поставлял марганец из подстилающих доломитов в процессе их выветривания, то второй вариант подразумевает существенный перенос металла из неизвестных коренных источников, расположенных на значительном удалении от области рудонакопления. Таким образом, для решения этого вопроса, необходимо провести экспериментальные исследования, изучающие природу, минералогию и источник сноса терригенных отложений «вмещающих материалов» верхнего рудного разреза. **Цель работы** – уточнить природу марганценосных терригенных залежей «Westwits alluvium» и, что самое важное, определить их коренной источник поступления и собственно минеральный состав. **Методики исследования** включали: петрографическое описание пород, геохимические анализы методами XRF и SEM, подсчеты объемного состава детритовых минералов и анализ дискриминационных диаграмм. **Результаты.** В результате проведенных исследований было установлено, что терригенные зёрна в основном представлены кварцем. Содержание полевых шпатов, минералов цемента и глинистых минералов не более 20%. Использована классификация составов терригенного материала, основанная на подсчете в объемных процентах зерен кварца, полевого шпата, обломочных зерен других пород (вулканических, магматических и метаморфических пород), слюды и др. По этим данным были определены вероятные источники сноса, которыми являются породы Рэнд-Антиклинального хребта, расположенного к югу от изучаемого региона, а также архейские граниты, гнейсы и мафические-ультрамафические породы Каапваальского кратона. Осадконакопление происходило в низменной равнине с тропическим умеренно влажным и субгумидным климатом. Здесь, при повышенном pH воды происходило интенсивное выщелачивание пород и замещение детритовых зерен разного минерального состава диоксидом марганца.

Ключевые слова: марганцовистый аллювий, третичный, терригенные отложения, Каапваальский кратон, Южная Африка.

Для цитирования: Пхарое Б.Л., Евдокимов А.Н. Состав и реконструкция источников сноса терригенных отложений на северо-западе ЮАР. *Геология и геофизика Юга России*. 2020. 10 (4): 124 – 149. DOI: [10.46698/VNC.2020.48.31.008](https://doi.org/10.46698/VNC.2020.48.31.008).

Благодарность: Работа выполнена при финансовой поддержке Министерства образования ЮАР. Выражается благодарность Санкт-Петербургскому горному университету за возможность учиться в аспирантуре и за использование ряда приборов: SEM-EDS, XRD, поляризационные микроскопы и другие инструменты.

GEOLOGY, PROSPECTING AND EXPLORATION
OF SOLID MINERALS, MINERAGENCY

DOI: [10.46698/VNC.2020.48.31.008](https://doi.org/10.46698/VNC.2020.48.31.008)

Original paper

Composition and provenance reconstruction of terrigenous deposits in the North-West of South Africa

B. L. Pharoe^{1, 2}, A. N. Evdokimov¹

¹Saint Petersburg Mining University, 2, 21st Line, St Petersburg 199106,
Russian Federation, e-mail: benedictpharoe1@gmail.com;

²Council for Geoscience, P/Bag X 112, Pretoria 0001, South Africa,
e-mail: evdokimov48@list.ru

Received: 21.10.2020, revised: 16.11.2020, accepted: 30.11.2020

Abstract: Relevance. The North-West region of the Republic of South Africa was previously not considered to constitute of manganese mineralization of industrial value. However, recently published articles indicated the presence of secondary manganese mineralization in the weathering crust, underlain by the manganiferous Neoproterozoic dolomites. Manganese mineralization in this region occurs in the form of manganese nodules, powdered manganese wad, and manganese crusts. Manganese nodules are confined to the alluvial part of the ore section known as the «Westwits alluvium» and manganese wad is accumulated in karstic structures formed as a result of near-surface weathering, leaching, and dissolution of underlying manganese-bearing Neoproterozoic dolomites. Two potential sources of manganese are assumed: the first relates to the dolomites which are located directly under the ore body, and the second relates to the source areas of terrigenous deposits. If the first hypothesis suggests that manganese ore substances were supplied from the underlying dolomites during their weathering, the second option then implies a significant transfer of metal from unknown root sources located at a considerable distance from the area of ore accumulation. Thus, it is necessary to conduct petrographic study to reconstruct their source regions and understand the close relations with Mn mineralization. **Aim** is to clarify the nature of the manganese-bearing terrigenous deposits «Westwits alluvium» and, most importantly, to determine their root source of supply and the actual mineral composition. **Methodology** of study includes mainly: petrographic study of rocks, geochemical analyses with the use of XRF and SEM methods, modal compositional analysis of the detrital minerals, and analysis of discrimination diagrams. **Results.** As a result of the conducted research, it was found that terrigenous grains consist mainly of detrital quartz grains. The content of feldspars, cement minerals and clay minerals seldom exceeds 20%. The classification of terrigenous material based on the calculation of the volumetric percentage of the detrital framework grains: quartz, feldspar, clastic grains of other rocks types (volcanic, igneous and metamorphic rocks), mica, indicated probable source areas of the terrigenous sediments. These include metasedimentary rocks of the Rand Anticline Ridge which is located south of the studied region, and Archean granites, gneisses, and mafic-ultramafic rocks of the Kaapvaal Craton. In the basin of deposition, sedimentation occurred in a lowland plain within tropical region, characterized by moderately humid and sub-humid climatic conditions. These conditions, combined with oxidation and increased pH of the basin waters, contributed to the replacement of detrital grains with manganese dioxide.

Keywords: Manganiferous alluvium, Neogene, Tertiary, Terrigenous deposits, Kaapvaal Craton, South Africa.

For citation: Pharoe B.K., Evdokimov A.N. Composition and provenance reconstruction of terrigenous deposits in the North-West of South Africa. *Geologiya i Geofizika Yuga Rossii = Geology and Geophysics of Russian South*. (in Russ.). 2020. 10 (4): 124 – 149. DOI: 10.46698/VNC.2020.48.31.008.

Acknowledgements: The work was financially supported by the South African Ministry of Education. We are also grateful to the Saint Petersburg Mining University for the opportunity to enrol in a graduate school and for using a number of analytical instruments: SEM-EDS, XRD, polarizing microscopes and other instruments.

Введение

Северо-западный регион (известный как Хайфельд) ЮАР, расположенный на северном фланге Каапваальского кратона, имеет потенциал для разведки мелкомасштабной марганцевой минерализации вторичного происхождения, образовавшейся в зоне гипергенеза на верхней части разреза неогархейских доломитов (рис. 1). Этот регион до недавнего времени не являлся промышленно рентабельным. Однако, результаты исследований указывают на наличие оксидной минерализации марганца [Van Niekerk et al., 1999; Pack et al., 2000; Pharoe, Liu, 2018]. Первоисследователем этого региона является Де Вилльерс [De Villiers, 1960]. Им было обнаружено несколько небольших марганцевых рудопоявлений в коре выветривания, подстилаемой неогархейскими марганценосными доломитами серии Мальмани (AR₂) Трансваальской супергруппы. Его работа включает в себя анализ трех образцов марганценосных доломитов, отобранных на различных стратиграфических уровнях разреза. Полученные результаты показали в доломитах относительно высокое содержание марганца (сред. содержание – 5 масс. %), и Де Вилльерс пришел к выводу, что доломиты, вероятно, являлись источником формирования марганцевого вада. В последнее время были выполнены исследования, направленные на уточнение полученных данных о перспективах марганценосности региона, а также на выяснение генезиса рудного вещества [Pharoe, Liu, 2018; Pharoe et al., 2020]. Одним из аргументов в пользу перспективности территории на марганец являются многочисленные упоминания в литературе о сохранившейся здесь коре выветривания на толще карбонатных пород неогархейского возраста [Beukes et al., 1999; Van Niekerk et al., 1999; Pack et al., 2000; Pharoe et al., 2020]. Вероятным результатом корообразования могла быть концентрация марганцевых минералов до промышленных объемов.

Известно, что развитие постгондванского Африканского ландшафта было в основном сформировано накоплением третичных терригенных отложений вдоль древних эрозионных поверхностей (несогласий), известных как африканская поверхность поднятия и эрозии I и II, которые, по оценкам, развивались в позднем Мелу и в середине кайнозоя соответственно [Burke, Gunnell, 2008]. Поэтому для определения типа тектонической обстановки осадконакопления были развиты схемы классификации вещественного и гранулометрического составов, позволяющие определить на исследуемой территории не только вероятные коренные источники, но и направления сноса и области накопления терригенных осадков.

Для более систематизированного подхода к анализу составов зерен терригенного материала в отложениях региона детритовые зерна были разделены на группы, каждая из которых охарактеризована одним или двумя одинаковыми для этой группы свойствами зерен.

Например, обломки пород и зерна минералов, образованные в ходе денудации континентальной суши, представленной поднятиями фундамента в виде выступов кратонов, должны быть сходны между собой по преимущественно кварц-

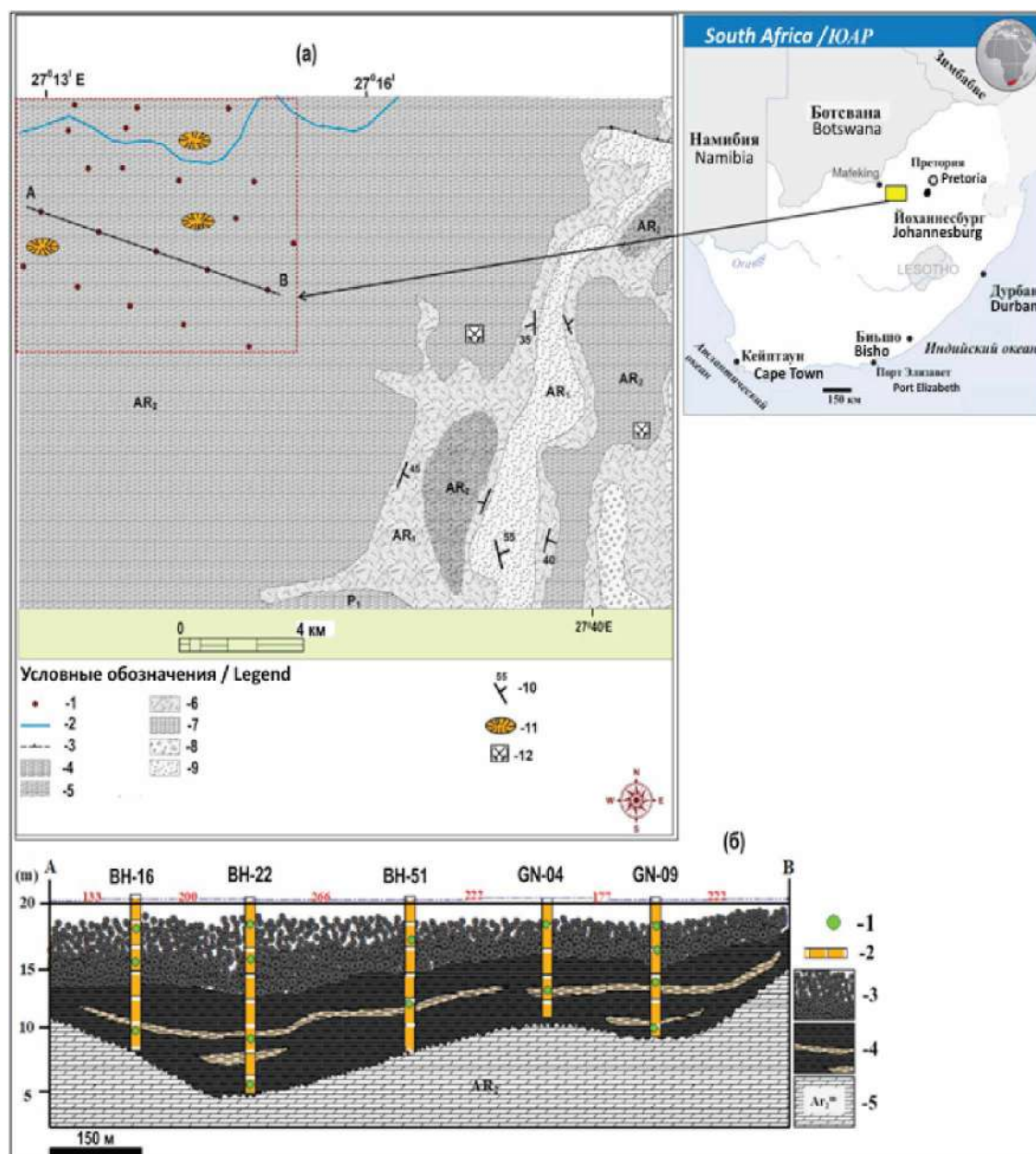


Рис. 1. Схема геологического строения (а) и разрез Северо-Западного рудопоявления Мп, ЮАР (б). (а): 1 – разведочные шурфы, 2 – палеодолины, 3 – разломы, 4 – алеврит (P₁), 5 – марганецсодержащие доломиты серии Мальмани (AR₂), 6 – кварцит из свиты Чёрного Рифа (AR₁), 7 – алеврит с прослоями песчаников (AR₁), 8 – золотоносные конгломераты с прослоями песчаников (AR₁), 9 – несортированные терригенные отложения, конгломераты и песчаники (AR₁), 10 – элементы залегания, 11 – карстовые воронки (P), 12 – исторические места разработки месторождений. (б): 1 – точки отбора проб, 2 – разведочные шурфы, 3 – марганцевые конкреции (N), 4 – порошкообразный марганцевый вад с прослоем глины (K₂?), 5 – марганецсодержащий доломит серии Мальмани (AR₂).

Fig. 1. Geological map of the North West manganese ore deposit (a) and a geologic cross section (A-B) which runs across boreholes BH-16, BH-22, BH-51, GN-04 and GN-9 on the map (b); where in (a): 1 – exploration pits, 2 – paleovalleys, 3 – faults, 4 – siltstone (P₁), 5 – manganese-bearing dolomites of the Malmani series (AR₂), 6 – quartzite of the Black Reef Formation (AR₁), 7 – siltstone with sandstone layers (AR₁), 8 – gold-bearing conglomerates with sandstone layers (AR₁), 9 – poorly-sorted terrigenous deposits, conglomerates and sandstones (AR₁), 10 – elements of occurrence, 11 – karst craters (P), 12 – historical sites of manganese mining.

полевошпатовому составу [MacLennan, Taylor, 1991]. В таких минералогических ассоциациях, в подчиненных количествах, могут быть: дистен, силлиманит, гранат, слюды и темноцветные минералы.

Напротив, терригенный материал, образованный в результате денудации магматических пород, слагающих островные дуги, должен быть насыщен темноцветными силикатными минералами: пироксеном, амфиболом, плагиоклазом, магнетитом, ильменитом и рутилом.

Терригенный материал размытых орогенных областей будет характеризоваться контрастными составами детритовых зерен, представляющими собой магматические комплексы, метаморфические и осадочные образования.

Пропорции вкладов детритового материала из областей проявления различных тектонических обстановок можно оценить по результатам анализов минеральных составов слагающих эти области горных пород [Dickinson et al., 1983; Jafarzadeh, Hosseini-Barzi 2008]. В то же время, эволюционные тренды изменения составов детритового материала в пространстве и во времени позволяют наметить смену его источников и пути транспортировки из областей обрамления бассейна.

Цель работы

Основной целью данной работы является уточнение природы марганценовых терригенных залежей «Westwits alluvium» и, что самое важное, определение их коренного источника поступления и собственно минерального состава.

Методы исследования

Для решения поставленной задачи был произведен сбор каменного материала на стенке разреза шурфов (ТС_01, ТС_02, ТС_03....., ТС_16), а также выполнена документация обнажений и горных выработок. Эта работа проводилась в ходе активной подготовки месторождения к эксплуатации, во время производства вскрышных работ и устройства карьера (рис. 2). Изучение каменного материала, определение его петрографического и минералогического составов, а также литологических особенностей, химического состава позволяет восстановить историю формирования марганценовых залежей, определить их место в тектонической модели развития района. Из проб было изготовлено 15 шлифов для выполнения петрографических исследований. Химические анализы проводились с помощью рентгенофлуоресцентной спектromетрии на спектрометре XRF MagiX Fast. Для качественного и полуколичественного химического анализа использовали сканирующую электронную микроскопию, проведенную на JSM-6460Lv и JSM7001F в режимах вторичных электронов и композиционного контраста, оснащенных энергодисперсионными спектрометрами X-Act и X-MAX80 в Центре Коллективного Пользования Санкт-Петербургского горного университета.

Для количественной оценки минерального состава использовался метод подсчета зерен минералов [Dickinson et al., 1983; Dickinson, 1985; Pettijohn et al., 1972; Pettijohn, 1975; Stunner et al., 1981; Шутов, 1972; Weltje et al., 1998; Varga et al., 2007; Motova et al., 2016]. В ходе подсчета, детритовые зерна были разделены по группам: Qm (монокристаллический кварц), Qp (поликристаллический кварц), P (плагиоклаз полевой шпат), K (калиевый полевой шпат), Lv (вулканические или мета-вулканические обломки пород) и Ls (зерна осадочных и метаосадочных пород). Модальный анализ составов терригенных отложений базируется на результатах подсчетов не менее 300 детритовых зерен в одном образце.

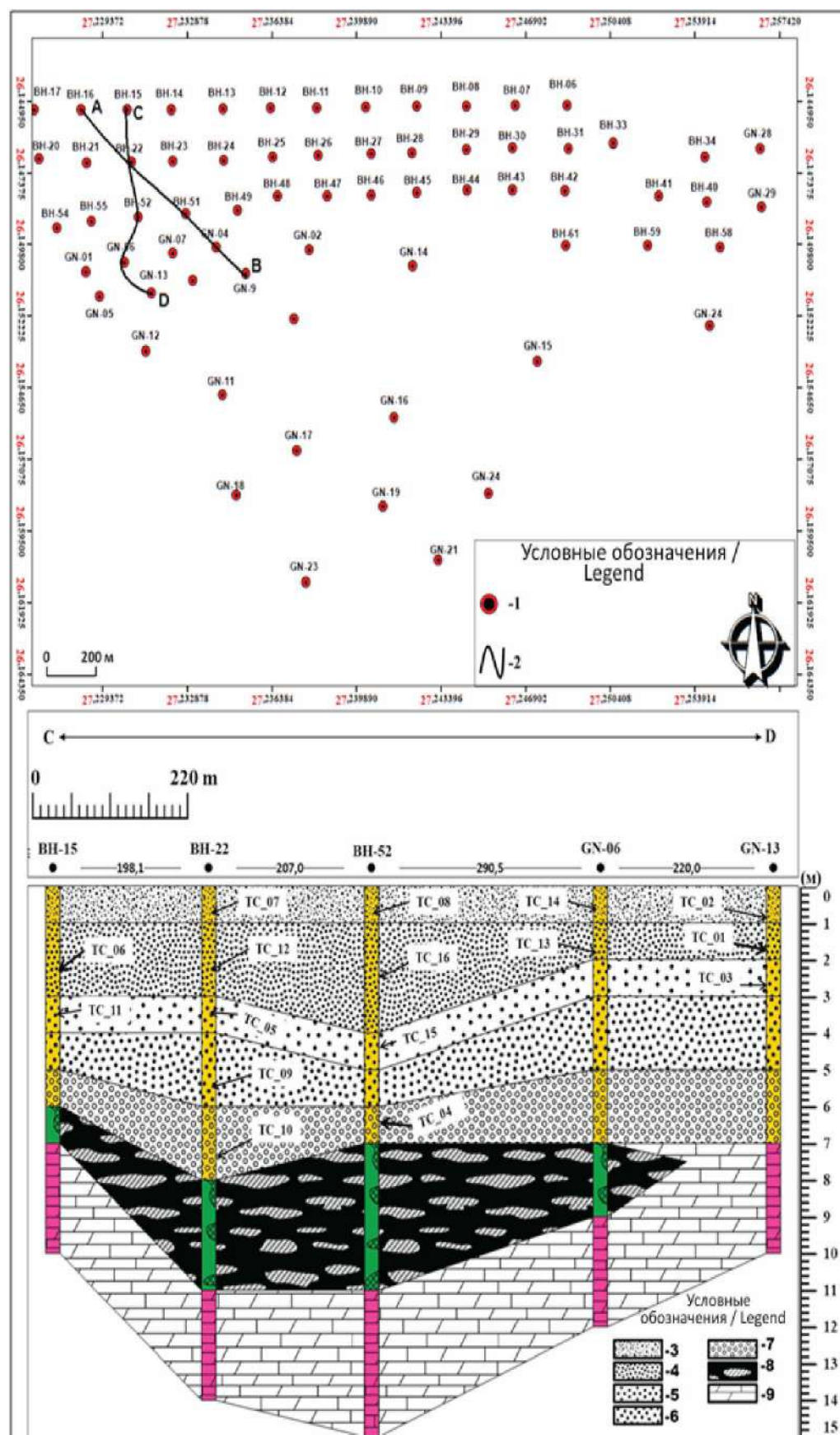


Рис. 2. План участка работ и геологический разрез по линии C-D с указанием точек отбора проб: 1 – разведочные шурфы, 2 – профили, 3 – мелкоконкреционные марганцевые руды (N_1), 4 – мелко-

среднеконкреционные марганцевые руды (N_1), 5 – среднеконкреционные марганцевые руды (N_1), 6 – крупноконкреционные марганцевые руды (N_1), 7 – крупноконкреционные марганцевые руды с фрагментами калькрета (N_1), 8 – марганцевый вад ($K_2??$), 9 – марганецсодержащий доломит с прослоем известняка (AR_2). /

Fig. 2. Exploration borehole plan and geological section along line C-D with indication of sampling points: 1- exploration pits, 2 – profiles, and 3 – small manganese nodules (N_1), 4- small – medium manganese nodules (N_1), 5 – medium manganese nodules (N_1), 6 – coarse manganese nodules (N_1), 7 – coarse manganese nodules with fragments of calcrete (N_1), 8- manganese wad ($K_2??$), 9- manganese dolomite with interlayers of limestone (AR_2).

В соответствии с методикой в шлифах подсчитывались разные по составу и по форме частицы минералов (в основном кварца, полевого шпата и фрагментов пород). Полученное число зерен разных минералов и обломков пород, исключая матрицу, цемент, слюду, тяжелые минералы, и карбонаты, – пересчитывалось на 100%, [Dickinson, 1985]. Результаты подсчета точек выносились на диаграммы.

Бинарная диаграмма « $\ln(Q/F)$ и $\ln(Q/RF)$ » по [Weltje et al., 1998] была использована для определения полуколичественного индекса выветривания осадков на период их образования. Диаграммы «Qt-F-L и Qm-F-Lt» по [Dickinson et al., 1983] применялись для определения тектонических условий образования осадочных пород. Тройная диаграмма по [Stunner et al., 1981] дала возможность определить тип материнских пород. Расчет соотношения детритовых зерен в шлифах и аншлифах был проведен с использованием петрографического поляризационного микроскопа.

Рентгенофлуоресцентный анализ собранных образцов горных пород выполнен в лаборатории при «Совете по наукам о земле» в ЮАР. Предел обнаружения порообразующих оксидов составляет 0,1%.

Гранулометрический анализ проб был сделан на просеивающей машине – As 400 control.

Геологическое строение региона

Третичные аллювиальные отложения района Хайфельд широко распространены в пределах северной части Каапваальского кратона. Они расположены в пределах древней эрозионной впадины на позднеархейском карбонатном основании, представленном доломитами серии Мальмани.

Каапваальский кратон занимает площадь около 1 200 000 км² территории Южной Африки и соединен с кратоном Зимбабве на севере складчатыми метаморфическими породами пояса Лимпопо. На юге и западе Кратон Каапвааль окружен протерозойскими орогенами, а на востоке моноклиналию Лебомбо, содержащей юрские магматические породы (рис. 3). В строении кратона участвуют нижнеархейские ультраосновные и основные зеленокаменно-измененные породы, прорывающие их трондьемиты и тоналиты, гнейсы и перекрывающие их кварциты, конгломераты, песчаники и сланцы серии Витватерсранд, вулканические лавы группы Вентерсдорп и марганценозные доломиты позднеархейского возраста.

Кристаллические позднеархейские карбонатные породы, преобладающие в Северном Каапваальском кратоне, представлены доломитами серии Мальмани. В последующем, в мел-неогеновое время, на доломитах была сформирована кора выветривания. В результате карстообразования поверхность доломитов Мальмани приобрела неровную рельефную форму, осложненную в трех местах изученной площади карстовыми воронками (рис. 1). Размер карстовых воронок колеблется от 50 до 70 м в диаметре.

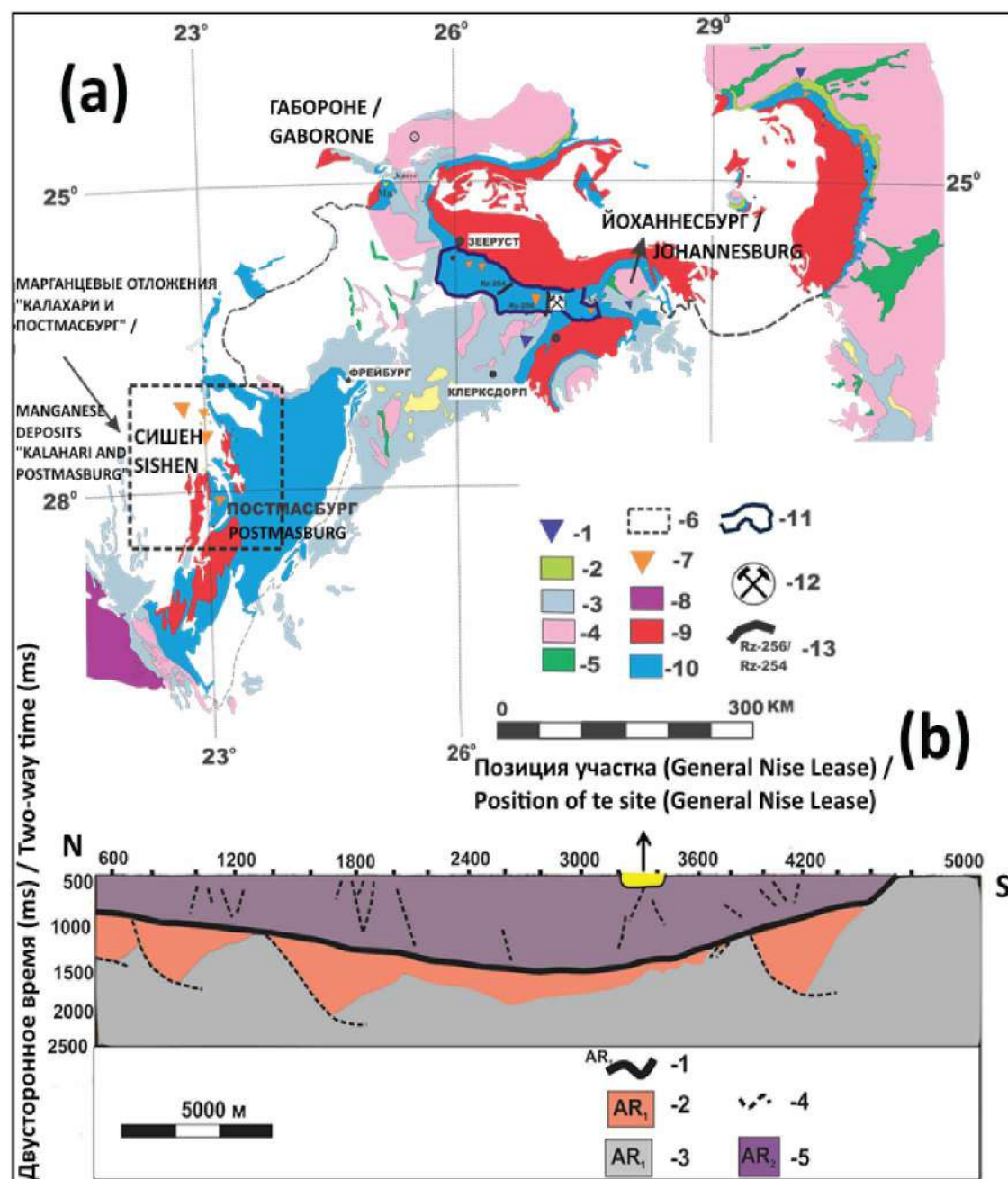


Рис. 3. (а), Геологическая карта Каапваальского Кратона по [карта изменена после Frimmel, 2014], где: (а), 1 – минерализация Au; 2 – базальный слой вулканогенно-осадочных пород (группа Волькберга, AR₂); 3 – пред-Трансваальская платформа (AR₁) (Понгола, Хейс, Витватерсранд и Вентерсдорп последовательность); 4 – архейские граниты (AR₁); 5 – архейские зеленокаменные пояса (AR₁); 6 – территория распространения марганцевых месторождений Калахари и Постмасбург; 7 – марганцевые месторождения; 8 – гранитные и метаморфические комплексы Намаква (K₁); 9 – обломочные осадочные толщи верхней части разреза (группы Претория и Постмасбург, T₂); 10 – карбонатные отложения (группы Chuniespoort и Campbell-Griquatown, AR₂); 11 – граница Северо-Западного рудопроявления марганца, представленного в настоящем исследовании; 12 – местоположение шахты (General Nice Mine); 13 – сейсмические профили, проходящие через Мальманийскую карбонатную платформу; (б), сейсмический профиль Rz-256: 1 – кварцит сери Черного Рифа (AR₁), 2 – вулканические породы Вентерсдорп, 3 – граниты, гнейсы фундамента, 4 – разломы, 5 – марганценозные доломиты (AR₂) [Tinker et al., 2002].

Fig. 3. Geological map of the Kaapvaal Craton [modified after Frimmel, 2014], where: 1 – Gold mineralization; 2 – Basal layer of volcanogenic-sedimentary rocks (Wolkberg Group, AR₂); 3 – Pre-

Transvaal platform (AR₁) (Pongola, Kheis, Witwatersrand and Ventersdorp Sequences); 4 – Archean granites (AR₁); 5 – Archean greenstone belts (AR₁); 6 – Territory of Kalahari and Postmasburg manganese deposits; 7 – Mn mineralization; 8 – Namaqua granite and metamorphic complexes (K₁); 9 – Clastic sedimentary units of the upper part of the section (Pretoria and Postmasburg, T₂); 10 – Carbonate deposits (Chuniespoort and Campbell-Griquatown Groups, AR₂); 11 – boundary of North West Mn mineralization; 12 – Location of the General Nice Mn Mine; 13 – Seismic profiles crossing through the Malmani carbonate platform; (b), Seismic profile Rz-256: 1 – Quartzite of the Black Reef series (AR₁), 2 – Ventersdorp volcanic rocks, 3 – Basement granites and gneisses, 4 – Faults, 5 – Manganiferous dolomites (AR₂) [Tinker et al., 2002].

В толще коры выветривания нижний слой сложен вадом чёрного цвета, его мощность варьирует от 0,5 до 1,5 м. Здесь встречаются прослои глины и песка красного цвета мощностью от 5 до 20 см. Верхний слой коры выветривания сложен марганцевыми конкрециями размером от 0,5 мм до 2 см. Мощность отложений верхнего слоя изменяется от 5 до 10 м (рис. 16). По данным горных работ и по наблюдениям выходов аллювиальных отложений, рудный пласт простирается с запада на восток на расстояние от 4,74 до 5,28 км. В направлении север-юг он простирается на расстояние от 1,3 до 2,73 км. На рисунке 4 показано, что верхний интервал рудной части разреза датируется неогеном, подстилающий вад предположительно мелового возраста, а отложения кровли разреза четвертичные.

В тектоническом плане регион представляет собой кратон, выступ фундамента архейского возраста. Северный фланг кратона тектонически нарушен протерозойскими магматическими интрузиями и ударным воздействием метеорита Вредефорт. Здесь зафиксирован ряд сбросов, образующих структуру грабена, что видно на сейсмическом профиле Rz-256.

Петрографическая характеристика марганценосных отложений

Петрографический состав рудных горизонтов изучался в 16 образцах, взятых из различных интервалов стратиграфического разреза. В соответствии с классификациями осадочных пород В. Д. Шутова [Шутов, 1972] все исследуемые образцы относятся к кварцевой группе песчаников представлены кремнекластитокварцевыми, полево-шпат-кварцевыми и мезомиктовыми кварцевыми песчаниками. Отложения региона Хайфельд представлены терригенным обломочным материалом с хорошо отсортированными округлыми до менее округленными (80%) и угловатыми детритовыми зёрнами (20%) в песчаниках (рис. 6). Размер детритовых зёрен в этих отложениях изменяется от 0,1-0,3 до 1,0 мм. Для них характерна массивная текстура. Цемент пленочный, регенерационный и поровый, представлен оксидами марганца и железа. В составе обломочного материала песчаников преобладают кварц (70-90%) и калиевые полевые шпаты (2-15%). Второстепенные минералы – магнетит, слюда, сидерит, мусковит и оксиды марганца. Зёрна кварца, полевого шпата, а также обломки пород покрыты коркой оксидов железа и марганца и заключены в цемент того же состава. Диагенетические изменения представлены распадом детритовых зёрен (кварца, обломков пород) и формированием оксидов марганца и железа. Распад полевого шпата с образованием глинистых минералов также распространен (рис. 6).

В более грубозернистых осадках преобладают обломочные зёрна размером от 0,25 до 0,50 мм, реже – от 1 до 1,5 мм. Цемент обычно оксидно-марганцовистый, глинистый, железистый и карбонатный. В составе обломков в основном кварц

Эратема / Erathem	Система / System	Отдел / Series	Индекс / Index	Стратиграфическая колонка / Stratigraphic column	Глубина от поверхности (m) / Depth from surface (m)	Характеристика пород / Characteristics of rocks
KZ	Четвертичная / Quaternary	Голоцен / Holocene	Q		0	Гуминовый верхний слой почвы с корнями растений / Humic topsoil with plant roots
		Эоплейс- тоцен / Eopleistoc ene			1	Красноцветная почва / Red soil
KZ	Неогеновая / Neogene	Миоцен / Miocene	N1		2	Аллювиальные отложения с марганцевыми конкрециями / Alluvial deposits with manganese nodules
					3	
					4	
					5	
					6	
					7	
					8	
					9	
					10	
					11	
MZ	Мелю вая / Creta ceous	Верхний / Upper	K ₂ ??		12	Порошкообразн ый марганцевый вад / Powdered Manganese Wad
AR			AR ₂		Марганцевоносн ый доломит / Manganese- bearing dolomite	

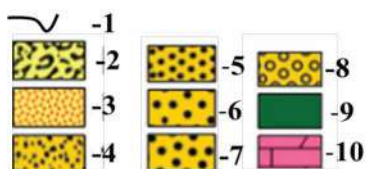


Рис. 4. Стратиграфическая колонка Северо-Западного рудопоявления марганца: 1 – несогласие, 2 – гуминовый верхний слой почвы, 3 – красная почва, 4 – мелкоконкреционные марганцевые руды, 5 – мелко-среднеконкреционные марганцевые руды, 6 – среднеконкреционные марганцевые руды, 7 – крупноконкреционные марганцевые руды, 8 – крупноконкреционные марганцевые руды с фрагментами калькрета, 9 – марганцевый вад, 10 – марганецсодержащий доломит.

Fig. 4. Stratigraphic sequence of the North West Mn deposit: 1 – erosional surface/unconformity, 2 – organic rich soil cover, 3 – red massive lateritic soil, 4 – fine fraction of manganese nodules, 5 – fine-medium fraction of manganese nodules, 6 – medium fraction of manganese nodules with coarser rock fragments, 7 – coarse fraction of manganese nodules, 8 – very coarse fraction of manganese nodules with coarser manganese and iron coated fragments, 9 – manganese wad, 10 – manganiferous dolomite.

(70-90%) и полевые шпаты (плагиоклаз и калиевый полевой шпат; 16-20%), то есть песчаник кварцевый и олигомиктовый. Акцессорные минералы: мусковит, каолинит, андалузит, циркон и ильменит. Обломки пород (5-15%) представлены поликристаллическими зернами кварца с волнистым угасанием, включениями ильменита и циркона и фрагментами кварцитов. Вторичные изменения выражены слабой пелитизацией калиевых полевых шпатов (рис. 6г).

Распределение фигуративных точек составов аллювиальных пород рудопроявления марганца Северо-Западное на диаграмме Qt-F-L (кварц, полевой шпат и обломки пород) [Шутов, 1972] свидетельствует о том, что они соответствуют полю составов кремнекласитокварцевых, полевошпатовкварцевых и мезомиктовых кварцевых песчаников (рис. 5).

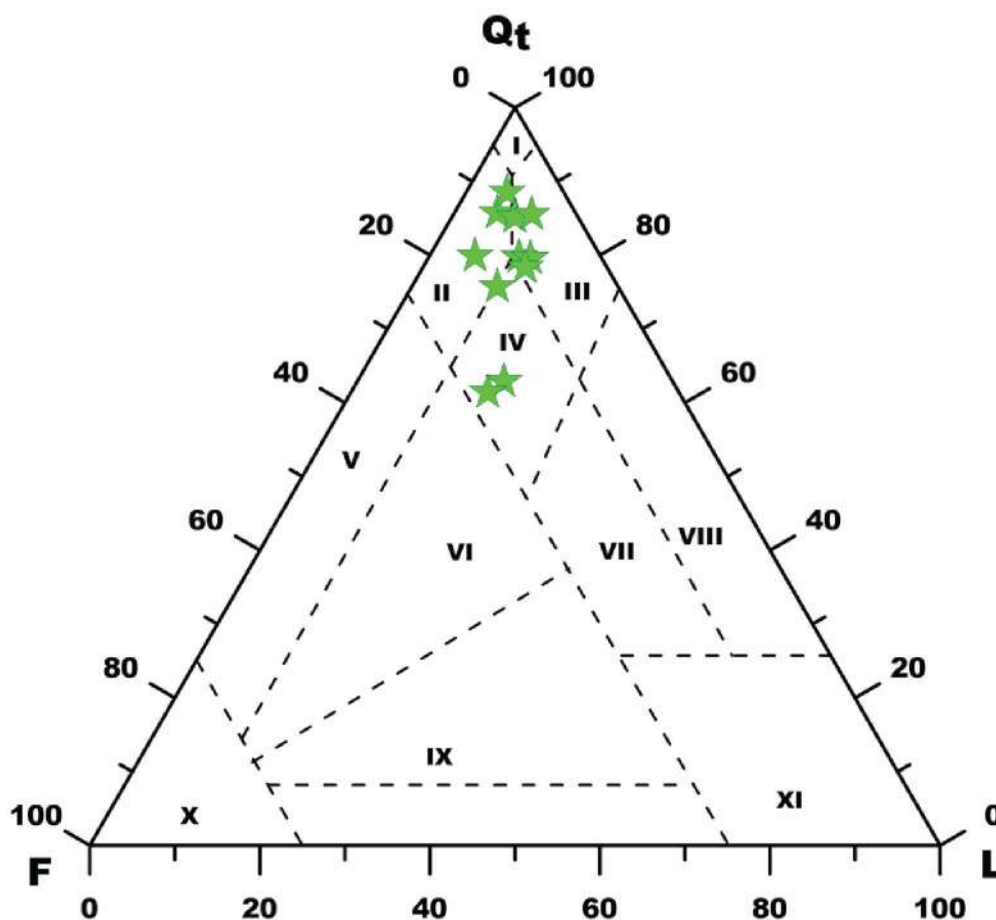


Рис. 5. Классификация терригенных отложений на основе схемы, предложенной [Шутов, 1972]; где кварцевая группа песчаников представлена следующими фациями: I – мономиктовые кварцевые, II – кремнекласитокварцевые, III – полево-шпат-кварцевые, IV – мезомиктовые кварцевые. Грауковая группа: V – кварцевые, VI – полевошпат-кварцевые, IX – кварц-полевошпатовые, X – собственно граувакки, XI – поле песчаников не чисто терригенного происхождения. Аркозавая группа: VII – граувакковые аркозы, VIII – собственно аркозы. / Fig. 5. Classification of the terrigenous grains based on the schemes proposed by [Shutov, 1972]; where: quartz-arenite group of sandstones are represented by the following facies: I – monomictic quartzose sandstones, II – siliciclastic quartzose sandstones, III – feldspathic-quartzose sandstones, IV – mesomictic-quartzose sandstones. Greywacke group: V – quartzitic sandstones, VI – feldspathic-quartzose sandstones, IX – quartz-feldspathic sandstones, X – greywacke, XI – sandstone field which is not of purely terrigenous in origin. Arkoses group: VII – greywacke arkose, VIII – arkoses. The classification is based on the modal composition (volumetric percentage) of framework grains.

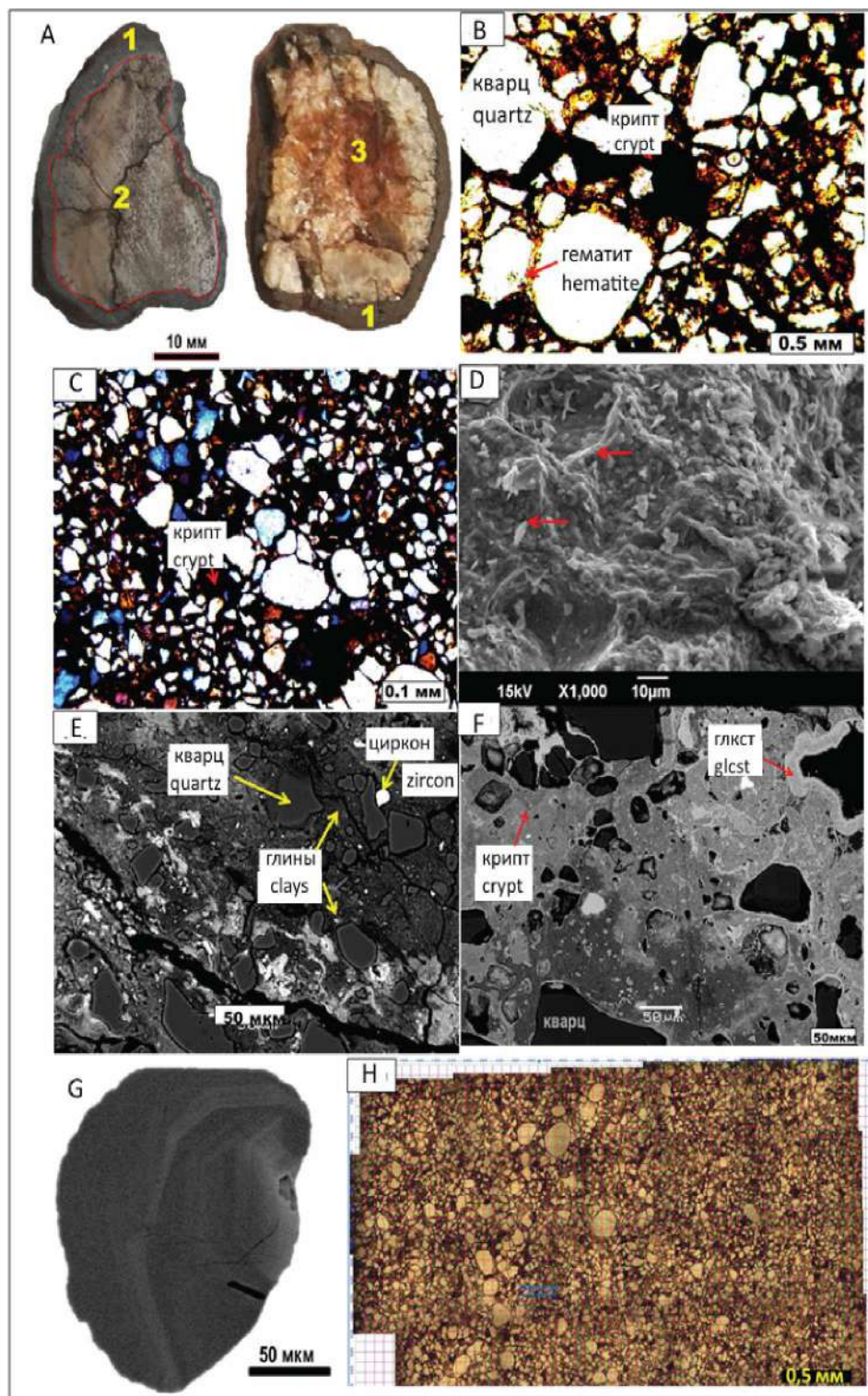


Рис. 6. Микрофотографии шлифов и анишлифов, полученные в сканирующем электронном микроскопе и с помощью поляризационного микроскопа. Они показывают наличие в исследуемых образцах аутигенных глинистых минералов и оксидов марганца и железа. (а) образцы изучаемого объекта: 1 – аккреционные оболочки оксидов марганца и железа, 2 – ядро песчаника, 3 – ядро кварцита; (b) гематит (Fe_2O_3) встречается в виде цементных покрытий вокруг зерен каркаса в терригенных обломках и в виде чередующихся пластинок с фазами марганцевых оксидов; (c) диагенетическое замещение детритовых зерен и ранних цементных минералов оксидом марганца-криptomеланом (крипт); (d) иллитовые гранулы, растущие из основной массы каолинита во время иллитизации; (e) зона изменения детритовых зерен полевого шпата, приводящая к образованию

глин; (f) белый фон представляет диагенетическое происхождение аутигенных фаз оксида марганца (криптомелан-крипт), замещающих детритовые зерна, и позднее осаждение галаксита (глкст) по краям порового пространства; (g) детритовое зерно циркона, как указано в д; (h) образец каркаса для подсчета детритовых зерен. /

Fig. 6. Photomicrographs of thin sections and polished sections studied by scanning electron microscopy and polarized microscope. They show the presence of authigenic clays and oxides of manganese and iron in the studied samples. (a) Samples of the studied object: 1-coalescence of manganese and iron oxides, 2-the core of sandstone, 3 – the core of quartzite; (b) hematite (Fe_2O_3) occurs as cement coatings around the framework grains in terrigenous sediments and as an alternating thin coating films with phases of manganese oxides; (c) diagenetic replacement of detrital grains and early-formed cement minerals with manganese oxide-cryptomelane (crypt); (d) illite granules growing from the main mass of kaolinite during illitization; (e) alteration of detrital feldspar grains, leading to the formation of clays; (f) the white background represents the diagenetic origin of authigenic phases of manganese oxide (cryptomelane-crypt), replacing detrital grains, and a late stage diagenetic mineral formation of galaxite (glcst) around the edges of the pore spaces; (g) detrital grain of zircon, as specified in d; (h) sample of point counted framework grains.

Характеристика химического состава пород

В валовых пробах изученного района содержания кремнезема изменяются в интервале от 50 до 79 мас.%. Количество Al_2O_3 варьирует в количествах – от 6 до 11 мас.%, а содержание MnO составляет от 0,7 до 19 мас.%. Содержания породообразующих оксидов и микроэлементов в проанализированных образцах приведены в таблице 1. Породы представляют собой смесь алюмосиликатного и силикатного материала с Fe-Mn конкрециями или микроконкрециями, либо силикокластические породы с железомарганцевым цементом. Химический состав проб ТС-02, ТС-07 и ТС-15 соответствует составу кремнисто-глинистых пород, ТС-08 и ТС-14 – глинистым кремням, а ТС-16 – высококремниевому силициту, с высоким содержанием железа и марганца.

Очевидно, что поступление марганца и железа тесно связано с повышенными содержаниями кобальта, хрома, никеля и ванадия в пробах изученных пород (табл. 1), которые обычно ассоциируют с основными и ультраосновными породами. По-видимому, концентрация этих элементов обусловлена длительным выветриванием коренных пород и последующим отложением их в бассейне, в котором сформировались в позднем архее доломиты Мальмани.

Так, на классификационной диаграмме $\log (Na_2O/K_2O) - \log (SiO_2/Al_2O_3)$, модифицированной [Pettijohn et al., 1975; Varga et al., 2007] (рис. 7) точки составов пород из «Северо-Западного» рудопроявления соответствуют полям составов аркозов, субаркозов и лититов.

Поскольку содержания породообразующих оксидов отражают состав, как детритового компонента терригенных пород, так и их цемента, то более объективные выводы о сходстве и различии исследуемых объектов можно сделать с учетом наиболее информативных соотношений между оксидами и их суммами (нефтехимические модули) и диаграммами модулей (рис. 8) предложенные Юдовичом и Кетрисом [Юдович, Кетрис, 2000].

Гидролизатный модуль (ГМ) $= [(Al_2O_3 + TiO_2 + Fe_2O_3 + FeO + MnO)/SiO_2]$ предназначен для количественной оценки двух наиболее важных гипергенных процессов выщелачивания и гидролиза. При инфильтрации метеорных вод из горных пород удаляются подвижные компоненты, в том числе не только щелочи и щелочноземельные породы, но и частично кремнезем. В результате гидролиза гидроли-

затные элементы накапливаются, образуя труднорастворимые гидроксиды (Al_2O_3 , Fe_2O_3 , TiO_2). Поэтому этот модуль используется для количественной оценки химического выветривания горных пород, то есть «зрелости». Его величина зависит от количества детритового кварца или обогащенных Si фрагментов породы, с одной стороны, и от состава полевых шпатов, а также глинистых компонентов в цементе, с другой.

Значения ГМ изучаемых образцов варьируются от 0,07 до 1,34 со средним значением 0,62. Это указывает на то, что терригенные породы наименее зрелы, и это может быть результатом вторично-гипергенных процессов, проводивших к образованию большего количества глинистых фракций в результате выветривания детритового материала (полевых шпатов; слюды и др.).

Фемический модуль (ФМ) $= [(\text{Fe}_2\text{O}_3 + \text{FeO} + \text{MnO} + \text{MgO})/\text{SiO}_2]$ – больше подходит для идентификации граувакк и аркозов. Он отражает интенсивность и темпы выветривания и захоронения: чем больше фемических элементов переходит в раствор во время выветривания, тем больше разница между песчаниками и типичными граувакками [Malinovsky, Tuchkova, 2010]. Слегка повышенные значения (0,07-1,02 со средн. 0,44) ФМ указывают на наличие вулканокластических граувакк и, вероятно, метавулканических обломков. Величина этого модуля указывает на вероятный источник сноса терригенных материалов из мафических и ультрамафических пород (Вентерсдорп лавы) Каапваальского Кратон.

Нормализованный модуль щелочности (НКМ) $= [\text{Na}_2\text{O} + \text{K}_2\text{O}/\text{Al}_2\text{O}_3]$ позволяет диагностировать примесь вулканического материала в осадочных породах. Этот показатель обычно выше в аркозах за счет широкого развития слюды и полевых шпатов, в том числе калийных сортов, и ниже в граувакках из-за преобладания глинистого цемента, фрагментов вулканов и глинисто-илистой матрицы [Юдович, Кетрис, 2000; Malinovsky, Tuchkova, 2010].

По словам Юдовича и Кетриса [Юдович, Кетрис, 2000], НКМ содержит информацию о соотношении двух основных типов щелочных алюмосиликатов: полевого шпата и слюды. Поскольку слюды являются минералами, гораздо более богатыми глиноземом, чем полевой шпат, низкие значения НКМ указывают на преобладание слюды, а высокие – на преобладание полевого шпата. Например, если НКМ породы больше 0,31, то она должна содержать калиевый полевой шпат (или какой-либо другой минерал с высоким содержанием калия), а если значение НКМ меньше 0,31, то присутствие калиевого полевого шпата, хотя и возможно, больше не является необходимым.

По отношению к этому модулю исследуемый объект показывает среднее значение, превышающее 0,31. Это указывает на преобладание полевого шпата над слюдой.

Титановый модуль (ТМ) $= [\text{TiO}_2/\text{Al}_2\text{O}_3]$. Величина титанового модуля (ТМ) является важной геохимической константой гипергенных процессов и была представлена в работах А. А. Мигдисова в 60-е годы, посвященных изучению осадочного чехла Русской плиты [Мигдисов, 1960]. Мигдисов также указал, что значения модуля титана зависят от климатических и фациальных условий формирования горных пород. Этот модуль используется для оценки состава горных пород (включая их содержание Ti) в исходных районах и для динамики осадконакопления, то есть отражает интенсивность сортировки титаносодержащих минералов и глинистого вещества.

Химический состав терригенных отложений северо-западного района. /
Chemical composition of the North West terrigenous sediments.

Компоненты (масс.%) / Components (wt%)	№ образцов / Sample No,															
	TC_01	TC_02	TC_03	TC_04	TC_05	TC_06	TC_07	TC_08	TC_09	TC_10	TC_11	TC_12	TC_13	TC_14	TC_15	TC_16
SiO ₂	61,64	76,40	54,79	43,00	61,11	58,73	76,49	81,61	50,58	46,82	62,37	64,70	69,71	79,50	76,94	93,91
TiO ₂	0,60	0,60	0,62	0,48	0,64	0,61	0,56	0,48	0,65	0,54	0,69	0,71	0,71	0,51	0,07	<0,01
Al ₂ O ₃	11,09	9,68	12,67	13,43	13,18	12,28	8,48	6,91	14,82	12,97	13,87	13,73	11,76	7,69	6,40	0,27
Fe ₂ O ₃	11,76	8,22	10,59	13,05	13,16	19,90	9,32	6,43	11,83	12,20	10,93	12,04	10,5	7,06	3,13	2,25
MnO	6,38	1,00	12,73	19,03	4,83	1,39	1,00	0,85	13,30	17,50	4,62	2,12	1,59	0,79	8,10	2,27
MgO	0,23	0,03	0,12	0,09	0,07	0,05	0,02	<0,01	0,08	0,10	0,09	0,05	0,05	<0,01	<0,01	<0,01
CaO	0,28	0,05	0,13	0,07	0,03	0,06	0,05	0,03	0,07	0,08	0,05	0,03	0,02	0,03	0,05	0,02
Na ₂ O	0,05	0,03	0,07	0,09	0,05	0,06	0,02	0,02	0,06	0,09	0,12	0,06	0,03	0,02	0,03	<0,01
K ₂ O	0,93	0,46	0,71	0,79	0,71	0,72	0,39	0,32	0,77	0,89	0,80	0,68	0,53	0,37	0,32	0,16
P ₂ O ₅	0,04	0,04	0,06	0,08	0,06	0,09	0,05	0,08	0,06	0,09	0,05	0,05	0,05	0,08	0,01	0,01
Cr ₂ O ₃	0,05	0,06	0,06	0,05	0,12	0,28	0,08	0,05	0,05	0,04	0,07	0,12	0,09	0,06	0,01	0,01
LOI	6,25	3,65	7,31	9,06	5,89	5,87	3,65	3,28	7,08	7,97	5,71	5,48	4,67	3,60	4,01	0,75
Сумма / Sum	99,29	100,22	99,86	99,22	99,85	100,05	100,10	100,06	99,36	99,28	99,37	99,77	99,54	99,71	99,08	99,65
Микроэлементы (г/т) / Trace elements (g/t)																
As	12	13	16	34	21	44	26	11	17	44	11	21	14	13	5,3	<4
Ba	1155	903	8386	20110	5490	1551	952	720	8390	14698	4358	3146	1677	637	6210	178
Bi	<3	<3	<3	<3	<3	<3	<3	<3	<3	<3	<3	<3	<3	<3	<3	<3
Br	<2	<2	<2	<2	<2	<2	<2	<2	<2	<2	<2	<2	<2	<2	<2	<2
Ce	81	72	442	907	291	148	73	64	242	563	238	262	157	62	347	<10
Co	36	27	103	204	63	77	29	19	56	99	48	72	70	20	66	1,8
Cr	263	375	468	480	847	2048	555	342	371	329	472	847	590	372	48	26

Cs	13	<5	26	44	21	13	9,8	5,2	22	36	16	12	12	7,1	11	<5
Cu	38	38	147	225	93	87	41	27	81	127	81	86	75	30	125	8,2
Ga	14	12	21	23	22	22	13	9,7	24	23	21	22	18	11	7	1,1
Ge	1,8	1,1	<1	<1	1,3	1,7	2,3	1,4	1,8	<1	1,4	2	1,4	1,3	<1	1
Hf	5,2	8,2	7,7	<3	11	10	10	6,6	5,3	7,7	8,5	12	10	7,9	3,9	4,3
La	41	36	203	278	79	36	29	28	109	242	70	48	34	27	102	18
Mo	<2	<2	8,1	19	4,8	4,8	2,6	<2	5,8	12	4,6	5,2	4,1	<2	7,9	<2
Nb	11	12	12	9,4	13	13	11	9,3	13	10	14	14	13	10	4	2,5
Nd	34	20	164	243	60	21	18	17	102	219	58	41	22	20	83	<10
Ni	118	62	247	404	111	123	65	46	71	129	102	140	149	48	156	5,7
Pb	28	33	74	147	107	97	39	28	122	96	71	104	77	30	27	<2
Rb	55	40	46	39	54	54	36	30	49	46	57	55	46	33	10	<2
Sc	16	14	42	67	27	24	12	9,5	31	44	26	22	18	11	21	<3
Se	<1	<1	1,2	1	1,4	<1	<1	<1	1,1	1,1	<1	1,6	<1	<1	<1	<1
Sm	<10	<10	16	11	<10	<10	<10	<10	<10	14	<10	<10	<10	<10	<10	<10
Sr	28	18	196	286	54	28	18	16	150	294	61	22	21	14	151	28
Ta	<2	<2	<2	<2	<2	<2	<2	<2	<2	<2	<2	<2	<2	<2	<2	2,1
Th	10	10	18	26	17	15	9,9	7,3	21	21	14	14	13	7,3	4,9	<3
Tl	<3	<3	<3	<3	<3	<3	<3	<3	<3	<3	<3	<3	<3	<3	<3	<3
U	<2	2,2	3,7	5,3	4,3	7,2	2,3	<2	3,2	5,1	2,6	4,3	2,9	<2	<2	<2
V	141	131	321	521	261	269	136	104	321	514	226	201	163	109	157	24
W	<3	<3	<3	<3	<3	<3	<3	<3	3,5	<3	<3	3,7	3,9	<3	<3	<3
Y	27	16	57	48	24	18	14	12	32	43	24	21	17	13	20	1,8
Yb	<3	<3	5,4	11	<3	3,5	3,4	3,7	<3	8,7	3,1	<3	<3	3,1	7,7	<3
Zn	24	22	35	30	35	45	27	30	36	61	37	35	30	29	6,3	<3
Zr	231	248	224	174	245	246	263	222	215	192	239	278	301	227	27	3,9

Образцы из исследуемого объекта характеризуются относительно низкими значениями ТМ в диапазоне от 0,04 до 0,07. Такое распределение значений ТМ, вероятно, объясняется возникновением обломочного материала в результате эрозии переработанных кратонных пород.

Тенденции в изменении среднего химического состава исследуемого объекта, а также их сходства и различия лучше всего иллюстрируются модульными диаграммами Юдовича и Кетриса [Юдович, Кетрис, 2000]: ГМ – НКМ, ГМ – ТМ, ФМ – ТМ и ФМ – НКМ (рис. 8). Наблюдаемые отрицательные корреляции между парами ФМ – ТМ и ТМ – ТМ указывают на петрогенное (Гранитное, вулканическое) происхождение пород и их принадлежность к сублитаренитам. Таким образом, литохимический состав терригенных пород исследуемых объектов свидетельствует об их низкой химической зрелости, гидродинамической переработке и высоких темпах физического выветривания. Основными источниками обломочного материала являлись мафические и ультрамафические породы внутреннего кратона с переменным привнесением примесей сиалического материала из эродированных блоков континентальной коры.

Таблица 2 / Table 2

**Литохимические модули терригенных отложений Северо-Западного региона. /
Lithochemical modulus of the terrigenous deposits of North West region.**

Образец / Sample	ГМ / НМ	ФМ / FM	НКМ / NMA	ТМ / TM
ТС_01	0,66	0,47	0,09	0,05
ТС_02	0,35	0,22	0,05	0,06
ТС_03	0,84	0,60	0,06	0,05
ТС_04	1,34	1,02	0,07	0,04
ТС_05	0,1	0,49	0,06	0,05
ТС_06	0,89	0,67	0,06	0,05
ТС_07	0,36	0,24	0,05	0,07
ТС_08	0,25	0,16	0,05	0,07
ТС_09	1,01	0,71	0,06	0,04
ТС_10	1,16	0,87	0,08	0,04
ТС_11	0,64	0,41	0,07	0,05
ТС_12	0,61	0,39	0,05	0,05
ТС_13	0,48	0,31	0,05	0,06
ТС_14	0,28	0,18	0,05	0,07
ТС_15	0,27	0,18	0,05	0,01
ТС_16	0,07	0,07	0,60	<0,01
Минимум / Minimum	0,07	0,07	0,05	0,004
Максимум / Maximum	1,34	1,02	0,60	0,069
Среднее значение / Average	0,62	0,44	0,09	0,05

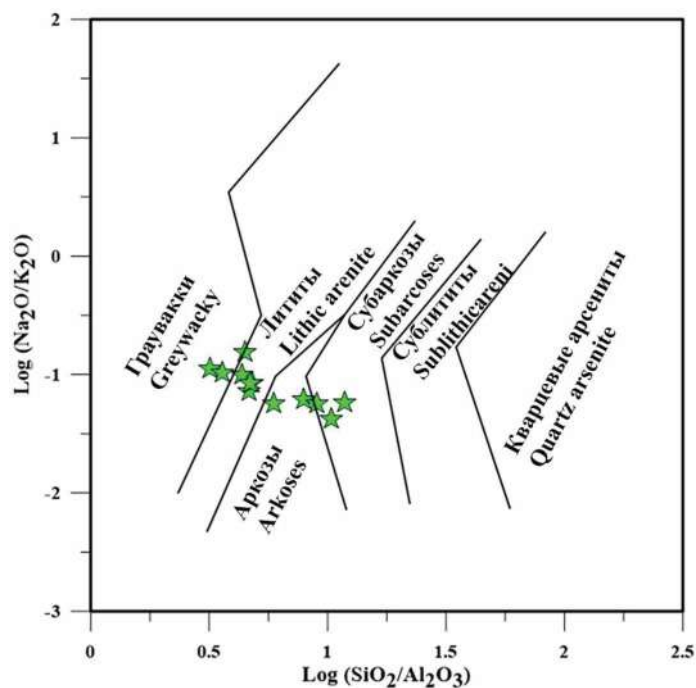


Рис. 7. Положение песчаников Северо-Западного рудопроявления на классификационной диаграмме [Varga et al., 2007], модифицированной Ф. Дж. Петтиджоном [Pettijohn, 1975]. / Fig. 7. The position of sandstones of the North-West Deposit on the classification diagram of [Varga et al., 2007], modified by [Pettijohn, 1975].

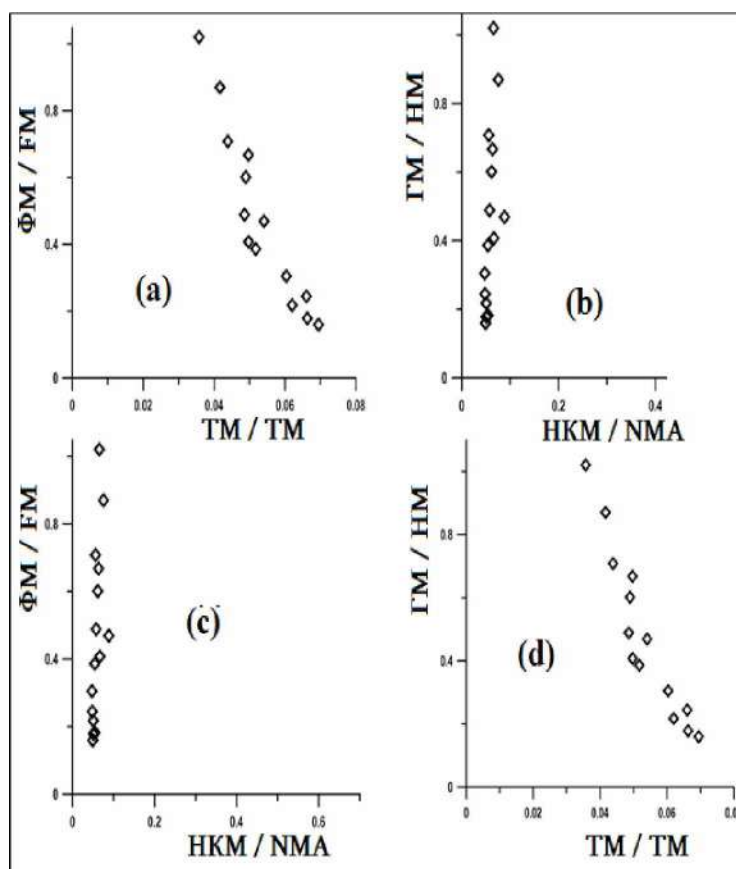


Рис. 8. Модульные диаграммы для терригенных пород исследуемого объекта [Юдович, Кетрис, 2000; Malinovsky, Tuchkova, 2010]. / Fig. 8. Module diagrams for the studied terrigenous rock [Юдович, Кетрис, 2000; Malinovsky, Tuchkova, 2010].

Характеристика процессов палеовыветривания

Степень химического изменения терригенных пород обычно определяется с помощью индекса химического выветривания CIA [Nesbitt, Young, 1982], который рассчитывается по формуле (молекулярные массы): $CIA = [Al_2O_3 / (Al_2O_3 + CaO^* + Na_2O + K_2O)]$, где CaO^* рассчитывается как доля CaO без учета кальция, входящего в состав карбоната. Для графического выражения степени химического изменения терригенных пород используется диаграмма $(Al_2O_3 - (CaO^* + Na_2O) - K_2O)$ [Nesbitt, Young, 1989; Sklyarov, 2001], с помощью которой можно определить направленность выветривания пород питающей провинции в процессе седиментогенеза, а также допустимость применения индекса CIA для определения степени химического выветривания [McLennan et al., 1993]. На диаграмме $(Al_2O_3 - (CaO^* + Na_2O) - K_2O)$ (рис. 9) точки составов терригенных пород, имеющие значения K_2O/Na_2O от 5 до 20 образуют тренд, слегка параллельный линии $Al_2O_3 - K_2O$. Такой тренд может свидетельствовать о том, что эти породы были подвержены эпигенетическим преобразованиям [Yapaskurt, 1994; Yudovich, Ketris, 2008], в процессе которых произошел вынос Na_2O [McLennan, 2001; Varga, Szakmány, 2004; Varga et al., 2007], а также распад детритовых обломков, и последующее образование марганцевых и глинистых минералов в поровых пространствах.

Однако, полученные значения индекса химического выветривания пород северо-западного района не позволяют в полной мере их использовать, так как индекс CIA [Nesbitt, Young, 1989] учитывает содержания Na_2O , количество которого в этих отложениях незначительно.

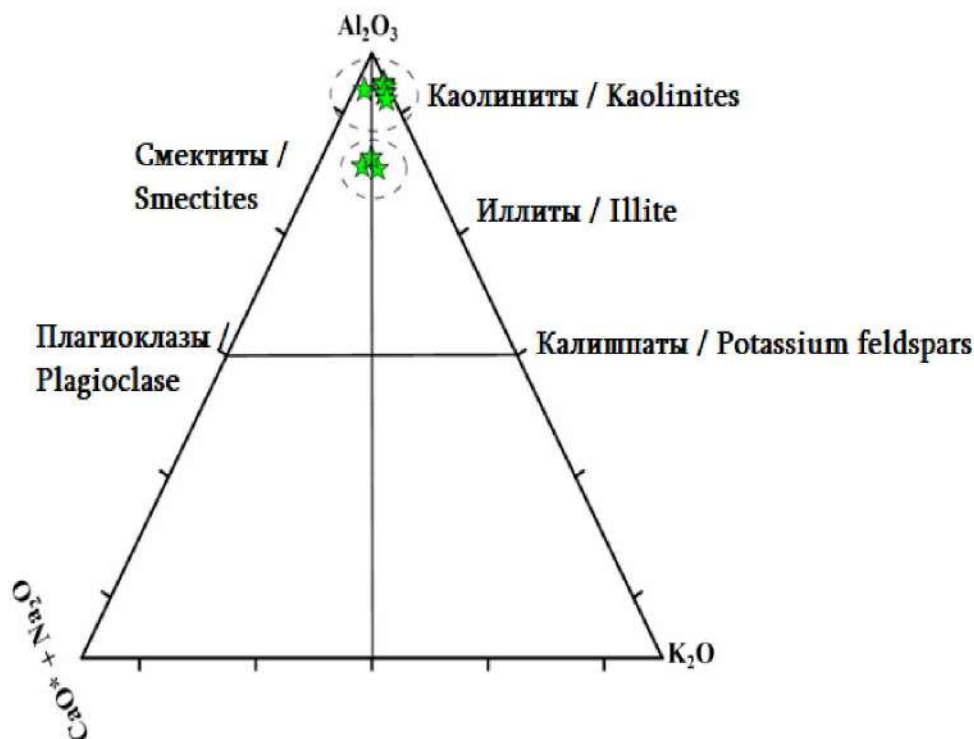


Рис. 9. Диаграмма $Al_2O_3 - CaO^* + Na_2O - K_2O$ [Nesbitt, Young, 1989] для терригенных пород северо-западного региона. /

Fig. 9. A – CN – K ($Al_2O_3 - (CaO^* + Na_2O) - K_2O$) diagram [Nesbitt, Young, 1989] for Highveld terrigenous deposits.

Обсуждение результатов

Проанализированные марганецсодержащие породы в основном сложены хорошо отсортированным и окатанным материалом (см. рис. ба – в), что может указывать на удаленность от областей питания бассейна пород источника седиментации.

Расположение фигуративных точек пород северо-западного региона на диаграмме $F - Qt - L$ (полевые шпаты – кварц – обломки пород) (рис. 10) [Dickinson et al., 1983] свидетельствует о том, что они образовались в основном за счет разрушения пород слагающих кратоны.

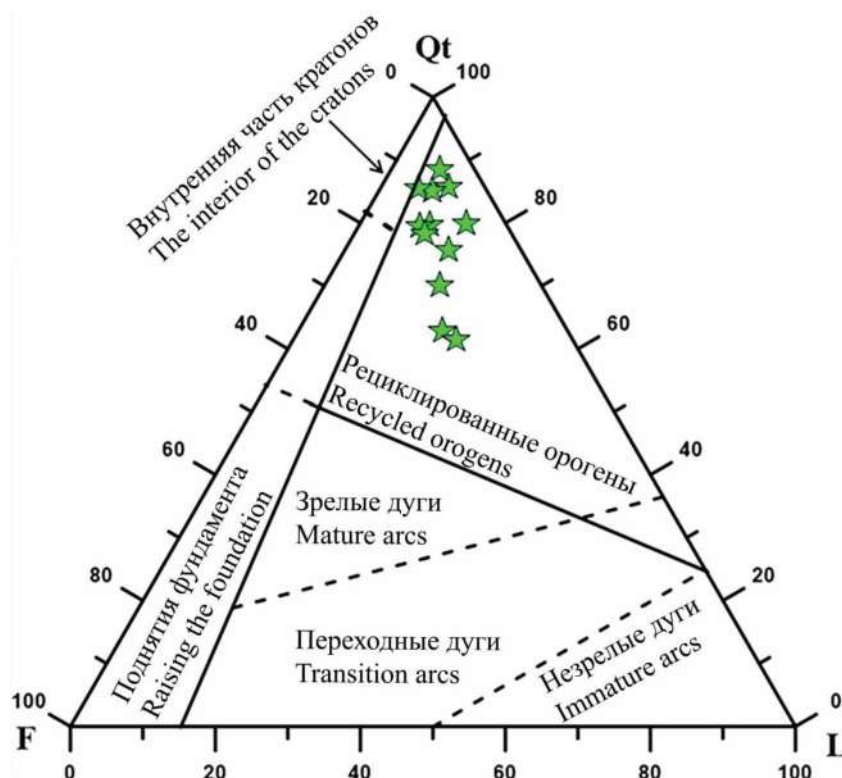
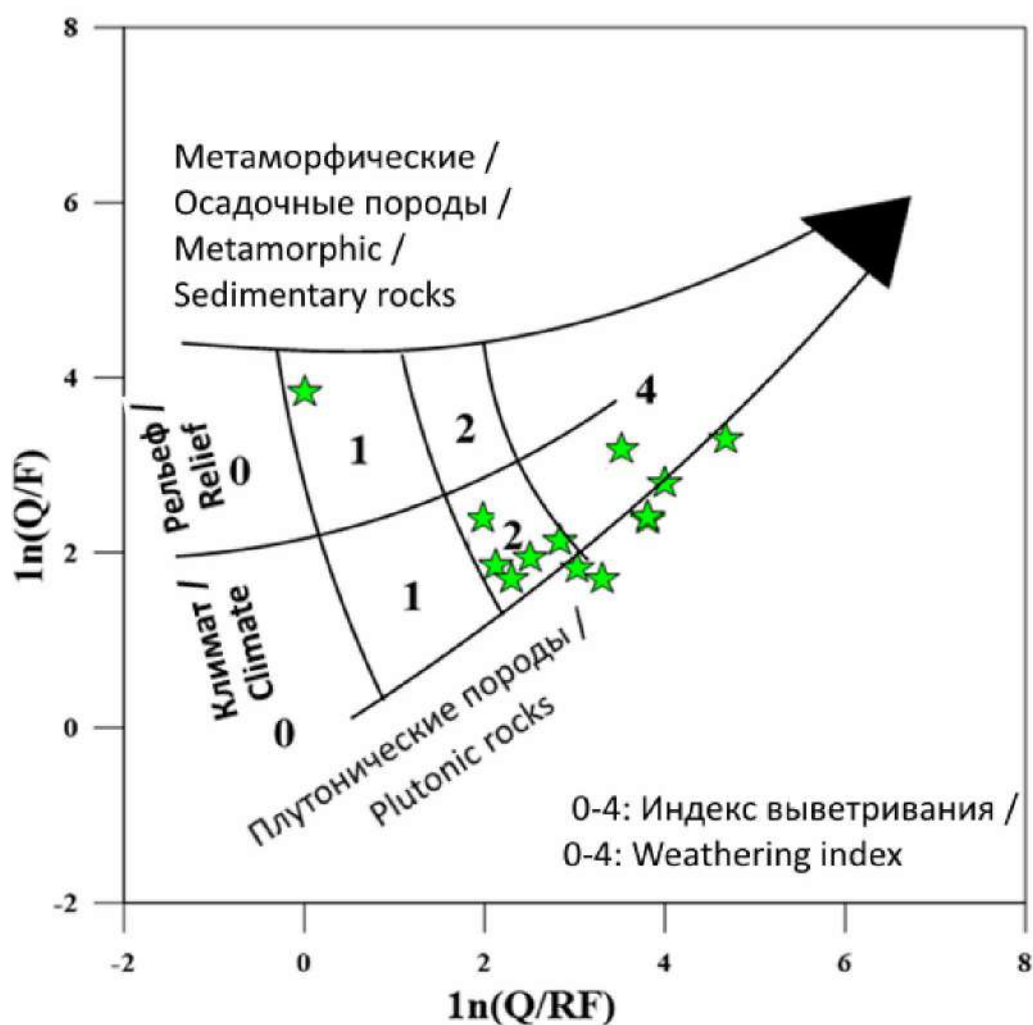


Рис. 10. Диаграмма $F - Qt - L$ (полевые шпаты – кварц – обломки пород) для терригенных пород северо-западного региона [Dickinson et al., 1983]. /

Fig. 10. $F - Qt - L$ classification diagrams (feldspars – quartz (total quartz and monocrystalline quartz content – rock fragments) for the North West terrigenous gravelites [Dickinson et al., 1983].

Weltje и др. [Weltje et al., 1998] предложили использование логарифмического отношения между количествами детритовых обломков кварца, лититовых фрагментов пород и полевых шпатов. Основываясь на нем, можно видеть, что наши образцы попадают в поле № 2 и располагаются в близости от поля № 4. Это свидетельствует о том, что осаждение детритового материала происходило либо на низких равнинах с умеренным и субгумидным климатом, или в тропических влажных условиях в пределах областей умеренного и низкого рельефов соответственно (рис. 11). Транспортировка и перемещение осадков на большие расстояния способствует смещению аналитических данных в сторону поля распространения фигуративных точек составов пород, характерных для более влажного климата, а не засушливых регионов [Zaid, 2012].

Обилие монокристаллического кварца в песчанике объясняется процессами истирания поликристаллических зерен при транспортировке осадка из районов рас-



Полуколичественный индекс выветривания / Semi-quantitative weathering index			Рельеф / Relief		
			Высокие горы / High mountains	Умеренные холмы / Moderate hills	Равнины / Plains
			0	1	2
Климатические осадки / Climatic precipitation	Полузасушливые и средиземный / Semi-arid and Mediterranean	0	0	0	0
	Умеренный субгумидный / Moderate sub-humid	1	0	1	2
	Тропический влажный / Tropical wet	2	0	2	4

Рис. 11. Логарифмы соотношений на диаграмме по [Weltje et al., 1998]. Q – кварц, F – полевой шпат, RF- фрагменты породы. /

Fig. 11. Log-ratio diagram from [Weltje et al., 1998]. Q: quartz, F: feldspar, RF: fragments of rock. Fields 1-4 refer to semi-quantitative weathering indices, determined on the basis of relief and climate, as indicated on the table.

пространения метаморфических пород. Низкий процент полевых шпатов и обломков горных пород и их отсутствие в некоторых образцах подразумевают источник терригенного материала из районов обнажения кратонов, которые сложены гнейсами и кварцитами.

Значения 0, 1 и 2 представляют собой осадки из полусасушливых и средиземноморских, умеренных субгумидных и тропических влажных климатических условий и высокогорного (0), умеренных холмов (1) и низких равнин (2) рельефов. В полуколичественных значениях индекса выветривания в диапазоне 0-4 представлены незрелые, слегка выветрившиеся, умеренно выветрившиеся и интенсивно выветрившиеся отложения, соответственно, с минимумами, характерными для районов с низким рельефом или климатическим порогом, и максимумами, характерными для низменностей с тропическим влажным климатом.

Заключение

Результаты петрографического, минералогического и геохимического изучения каменного материала района Хайфельд, северо-западной провинции ЮАР дали возможность обосновать следующие выводы:

1. Макроскопически определенные марганцевые конкреции в районе исследования в основном состоят из силикатных и алюмосиликатных минералов и их сростаний, обрамленных по периферии оксидами марганца и железа. В качестве минеральной основы послужили литические аркозы, кремнекластитокварцевые, полевошпат-кварцевые с подчиненным количеством мезомиктовых кварцевых песчаников.

2. Фигуративные точки изученных проб на диаграмме «Qt – F-L» [Dickinson et al., 1983] соответствуют составам терригенного материала привнесенного из районов выходов на поверхности внутренних кратонов и рециклированных орогенов.

3. Седиментация происходила в пределах низких равнин вдоль тропического района, характеризующегося умеренными субгумидными и тропическими влажными климатическими условиями. Такие климатические условия благоприятствовали формированию латеритных кор выветривания на большей части африканского континента.

4. Обилие кварцевых зерен, составляющих в среднем до 80% и небольшой процент полевых шпатов в образцах дает основание утверждать, что изучаемый терригенный материал проходил вторичные изменения, приводивших к разложению полевых шпатов и темноцветных минералов при промывном гидролизе, что происходит при формировании каолиновых и латеритных кор выветривания.

5. За отложением осадков последовали две продолжительные стадии диагенеза. К ним относятся ранняя стадия, характеризующаяся уплотнением отложений и частичным растворением с изменением морфологии детритовых зерен. Вторая стадия минералообразования сопровождалась интенсивным растворением и замещением первичных цементов и минералов оксидами марганца и железа и каолинитом в результате изменения редокс-потенциала «окислительно-восстановительного потенциала» (Eh) и pH окружающей геологической среды, характерных для зоны окисления. Ритмичность и тонкозернистость отложений, тонкозернистые ламинарно-слоистые алеврито-глинистые осадки свидетельствуют об их формировании в прибрежно-мелководной озерной среде или в тиховодных условиях при отсутствии сильных течений.

6. Вышеизложенные результаты исследований позволяют предположить, что источниками терригенного материала, содержащего марганцевые руды, подвергнутого марганцевому оруденению в Северо- Западном районе ЮАР являлись архейские граниты и кварциты Каапваальского Кратона и Ранд-антиклинального хребта серии Черного рифа, которые выходят на поверхность вдоль северного обрамления района на более высоких отметках рельефа. По-видимому концентрация главных рудных элементов: марганца и железа, а также сопутствующих: кобальта, хрома, никеля и ванадия определена длительным корообразованием по доломитам серии Мальмани.

На основании этих результатов можно сделать вывод, что источник Mn в большей степени связан с выветриванием подстилающих доломитов, чем с возможным переносом металла из других коренных источников, расположенных на значительном удалении от зоны рудонакопления. В отличие от доломитов, которые содержат относительно повышенное содержание MnO (в среднем 4,5 мас.% по данным DeVilliers, 1960) ранее не было задокументировано, что коренные источники марганецсодержащих терригенных материалов содержат содержание марганца, превышающее среднее обилие земной коры.

Литература

1. Мигдисов А. А. О соотношении титана и алюминия в осадочных породах. // *Геохимия*. – 1960. – № 2. – С. 149-163.
2. Шутов В. Д. Граувакки. Труды ГИН АН СССР. Вып. 238. – М.: Наука, 1972. – С. 375.
3. Юдович Я. Э., Кетрис М. П. Основы литохимии. – СПб.: Наука, 2000. – С. 479.
4. Beukes N. J., Van Niekerk H. S., Gutzmer J. Post-Gondwana African land surfaces and pedogenic ferromanganese deposits on the Witwatersrand at the West Wits gold mine. // *South Afr. Journ. of Geology*. – 1999. – Vol. 102. – pp. 65-82.
5. Burke K., Gunnell Y. The African erosion surface: A continental-scale synthesis of geomorphology, tectonics, and environmental change over the past 180 million years. // *Geol. Soc. Of Amer. Memr.* – 2008. – Vol. 201. – 66p.
6. De Villiers J. The manganese deposits of the Union of South Africa: Pretoria. // *Geologic. Surv. of S. Afr Handbook*. – 1960. – No. 2. – 263 pp.
7. Dickinson W. R. Interpreting provenance relations from detrital modes of sandstones. // In: Zuffa G. G. (Eds) *Provenance of Arenites*. Springer, Dordrecht. – 1985. – Vol. 148. – 112 p.
8. Dickinson W. R., Beard L. S., Brackenridge G. R., Evjavec J. L., Ferguson R. C., Inman K. F., Knepp R. A., Linberg F. A., Ryberg P. T. Provenance of Northern American Phanerozoic sandstones in relation to tectonic setting. // *Geo. Soc. of Amer. Bulletin*. – 1983. – Vol. 94. – pp. 222-235.
9. Frimmel H. E. A giant Mesoproterozoic crustal gold-enrichment episode: possible causes and consequences for exploration. // In: Kelley K., Golden, H. C. (Eds) *Building exploration capability for the 21st Century*. Society of Econ. Geologists. – 2014. – Vol. 18. – pp. 209-234.
10. Jafarzadeh M., Hosseini-Barzi M. Petrography and geochemistry of Ahwaz Sandstone Member of Asmari Formation, Zagros, Iran: implications on provenance and tectonic setting. // *Revista Mexicana de Ciencias Geológicas*. – 2008. – Vol. 25 (2). – pp. 247-260.
11. Malinovsky A. I., Tuchkova M. I. Lithochemistry of the Paleo-island-Arc Complexes in the Orogenic Belts of the Russian Far East. // *Russian Journ. Pacif. Geology*. – 2010. – No. 4. – pp. 363-378.
12. McLennan S. M. Relationships between the trace element composition of sedimentary rocks and upper continental crust. // *Geochem., Geophys., Geosystems*. – 2001. – No. 2 (4). – pp. 1021.
13. McLennan S. M., Taylor S. R. Sedimentary rocks and crustal evolution: Tectonic setting and secular trends. // *Journ. of Geol.* – 1991. – Vol. 99. – pp. 1-21.

14. McLennan S. M., Hemming S., McDaniel D. K., Hanson G. N. Geochemical approaches to sedimentation, provenance, and tectonics. // In: M. J. Johnsson, A. Basu (Eds.), Processes controlling the composition of clastic sediments. Geo. Soc. of Amer. Spec. Paper. – 1993. – Vol. 284. – pp. 21-40.
15. Motova Z. L., Donskaya T. V., Gladkochub D. P. The composition and reconstruction of the source area for the late Precambrian terrigenous rocks of the Oselkovaya series (Biryusa Prisyaniye). // *Geodynamics & Tectonophysics*. – 2016. – No. 7 (4). – pp. 25-649.
16. Nesbitt H. W., Young G. M. Early Proterozoic climates and plate motions inferred from major element chemistry of lutites. // *Nature*. – 1982. – Vol. 299. – pp. 715-717.
17. Nesbitt H. W., Young G. M. Formation and diagenesis of weathering profiles. // *The Journal of Geology*. – 1989. – Vol. 97 (2). – pp. 129-147.
18. Pack A., Gutzmer J., Beukes N., Van Niekerk H. Supergene ferromanganese wad deposits derived from Permian Karoo Strata along the late Cretaceous-mid-Tertiary African land surface, Ryedale, South Africa. // *Econ. Geol. B.* – 2000. – Vol. 95. – pp. 203-220.
19. Pettijohn F. J. *Sedimentary Rocks* (Third edition). – New York: Harper & Row, 1975. – 628 p.
20. Pettijohn F. J., Potter P. E., Siever R. *Sand and Sand-stones*. – New York: Springer, 1972. – 158 p.
21. Pharoe B. K., Liu K. Stratigraphy of the pedogenic manganese nodules in the Carletonville area, North West Province of South Africa: A case study of the General Nice Manganese Mine. // *Journ. of Afr. Earth Sciences*. – 2018. – Vol. 143. – pp. 79-101.
22. Pharoe B. K., Evdokimov A. N., Gembitskaya I. M., Bushuev Y. Y. Mineralogy, geochemistry and genesis of the post-Gondwana supergene manganese deposit of the Carletonville-Ventersdorp area, North West Province, South Africa. // *Ore Geology Reviews*. – 2020. – Vol. 120. – 103-372 p.
23. Sklyarov E. V. (ed.). *Interpretation of geochemical data*. // Internet Engineering. Moscow. – 2001. – 288 p.
24. Suttner L. J., Basu A., Mack G. M. Climate and the origin of quartz arenites. // *Journ. of Sedim. Petrology*. – 1981. – Vol. 51. – pp. 1235-1246.
25. Tinker J., de Wit M., Grotzinger J. Seismic Stratigraphic Constraints on Neoproterozoic Evolution of the Western Margin of the Kaapvaal Craton, South Africa. *South Afr. // Journ. of Geology*. – 2002. – Vol. 105. – pp. 107-134.
26. Van Niekerk H. S., Beukes N. J., Gutzmer J. Post-Gondwana pedogenic ferromanganese deposits, ancient soil profiles, African land surfaces and palaeoclimate change on the Highveld of South Africa. // *Journ. of Afr. Earth Sciences*. – 1999. – Vol. 29. – pp. 761-781.
27. Varga A. R., Szakmány G. Geochemistry and provenance of the upper carboniferous sandstones from Borehole Diósvizsló-3 (Téseny Sandstone Formation, SW Hungary). // *Acta Mineralogica-Petrographica*, Szeged. – 2004. – Vol. 45 (2). – pp. 7-14.
28. Varga A., Szakmány G., Árgyelán T., Józsa S., Raucsik B., Máthé Z. Complex examination of the Upper Paleozoic siliciclastic rocks from southern Transdanubia, SW Hungary – Mineralogical, petrographic, and geochemical study. In: J. Arribas, M. J. Johnsson, S. Critelli (Eds.), *Sedimentary Provenance and Petrogenesis: Perspectives from Petrography and Geochemistry*. *Geologic. // Soc. of Amer. Spec. Papers*. – 2007. – Vol. 420. – pp. 221-240.
29. Weltje G. J., Meijer X. D., De Boer P. L. Stratigraphic inversion of siliciclastic basin fills: a note on the distinction between supply signals resulting from tectonic and climatic forcing. // *Basin Research*. – 1998. – No. 10. – pp. 129-153.
30. Yapaskurt, O. V. Stage analysis of lithogenesis. – M.: MSU, 1994. – 142 p.
31. Yudovich Y. E., Ketris M. P. Mineral indicators of lithogenesis. – Syktyvkar: Geoprint, 2008. – 564 p.
32. Zaid S. M. Provenance, diagenesis, tectonic setting and geochemistry of Rudies (Lower Miocene), Warda Field, Gulf of Suez, Egypt. // *Journ. of Afr. Earth Sciences*. – 2012. – Vol. 66. – pp. 56-71.

References

1. Migdisov A. A. About the ratio of titanium and aluminum in sedimentary rocks. *Geochemistry*, 1960. No. 2. pp. 149-163. (In Russ.)
2. Shutov V. D. Grauvakki. In: *Proceedings of the GIN of the USSR Academy of Sciences*. Issue 238. Moscow. Nauka, 1972. pp. 375. (In Russ.)
3. Yudovich Ya. E., Ketris M. P. *Fundamentals of lithochemistry*. Saint Petersburg. Nauka, 2000. 479 p. (In Russ.)
4. Beukes N. J., Van Niekerk H. S., Gutzmer J. Post-Gondwana African land surfaces and pedogenic ferromanganese deposits on the Witwatersrand at the West Wits gold mine. *South Afr. Journ. of Geology*, 1999. Vol. 102. pp. 65-82.
5. Burke K., Gunnell Y. The African erosion surface: A continental-scale synthesis of geomorphology, tectonics, and environmental change over the past 180 million years. *Geol. Soc. Of Amer. Memr.*, 2008. Vol. 201. 66p.
6. De Villiers J. The manganese deposits of the Union of South Africa: Pretoria. *Geologic. Surv. of S. Afr Handbook*, 1960. No. 2. 263 pp.
7. Dickinson W. R. Interpreting provenance relations from detrital modes of sandstones. In: Zuffa G. G. (Eds) *Provenance of Arenites*. Springer, Dordrecht, 1985. Vol. 148. 112p.
8. Dickinson W. R., Beard L. S., Brackenridge G. R., Evjavec J. L., Ferguson R. C., Inman K. F., Knepp R. A., Linberg F. A., Ryberg P. T. Provenance of Northern American Phanerozoic sandstones in relation to tectonic setting. *Geo. Soc. of Amer. Bulletin*, 1983. Vol. 94. pp. 222-235.
9. Frimmel H. E. A giant Mesoproterozoic crustal gold-enrichment episode: possible causes and consequences for exploration. In: Kelley K., Golden, H. C. (Eds) *Building exploration capability for the 21st Century*. Society of Econ. Geologists, 2014. Vol. 18. pp. 209-234.
10. Jafarzadeh M., Hosseini-Barzi M. Petrography and geochemistry of Ahwaz Sandstone Member of Asmari Formation, Zagros, Iran: implications on provenance and tectonic setting. *Revista Mexicana de Ciencias Geológicas*, 2008. Vol. 25 (2). pp. 247-260.
11. Malinovsky A. I., Tuchkova M. I. Lithochemistry of the Paleoisland-Arc Complexes in the Orogenic Belts of the Russian Far East. *Russian Journ. Pacif. Geology*, 2010. No. 4. pp. 363-378.
12. McLennan S. M. Relationships between the trace element composition of sedimentary rocks and upper continental crust. *Geochem., Geophys., Geosystems*, 2001. No. 2 (4). pp. 1021.
13. McLennan S. M., Taylor S. R. Sedimentary rocks and crustal evolution: Tectonic setting and secular trends. *Journ. of Geol.*, 1991. Vol. 99. pp. 1-21.
14. McLennan S. M., Hemming S., McDaniel D. K., Hanson G. N. Geochemical approaches to sedimentation, provenance, and tectonics. In: M. J. Johnsson, A. Basu (Eds.), *Processes controlling the composition of clastic sediments*. Geo. Soc. Of Amer. Spec. Paper, 1993. Vol. 284. pp. 21-40.
15. Motova Z. L., Donskaya T. V., Gladkochub D. P. The composition and reconstruction of the source area for the late Precambrian terrigenous rocks of the Oselkovaya series (Biryusa Prisyaniye). *Geodynamics & Tectonophysics*, 2016. No. 7 (4). pp. 25-649.
16. Nesbitt H. W., Young G. M. Early Proterozoic climates and plate motions inferred from major element chemistry of lutites. *Nature*, 1982. Vol. 299. pp. 715-717.
17. Nesbitt H. W., Young G. M. Formation and diagenesis of weathering profiles. *The Journ. Of Geology*, 1989. Vol. 97 (2). pp. 129-147.
18. Pack A., Gutzmer J., Beukes N., Van Niekerk H. Supergene ferromanganese wad deposits derived from Permian Karoo Strata along the late Cretaceous-mid-Tertiary African land surface, Ryedale, South Africa. *Econ. Geol. B.*, 2000. Vol. 95. pp. 203-220.
19. Pettijohn F. J. *Sedimentary Rocks* (Third edition). New York. Harper & Row, 1975. 628 p.

20. Pettijohn F. J., Potter P. E., Siever R. Sand and Sand-stones. New York. Springer, 1972. 158 p.
21. Pharoe B. K., Liu K. Stratigraphy of the pedogenic manganese nodules in the Carletonville area, North West Province of South Africa: A case study of the General Nice Manganese Mine. *Journ. of Afr Earth Sciences*, 2018. Vol. 143. pp. 79-101.
22. Pharoe B. K., Evdokimov A. N., Gembitskaya I. M., Bushuev Y. Y. Mineralogy, geochemistry and genesis of the post-Gondwana supergene manganese deposit of the Carletonville-Ventersdorp area, North West Province, South Africa. *Ore Geology Reviews*, 2020. Vol. 120. 103-372 p.
23. Sklyarov E. V. (ed.). Interpretation of geochemical data. Internet Engineering. Moscow, 2001. 288 p.
24. Suttner L. J., Basu A., Mack G. M. Climate and the origin of quartz arenites. *Journ. of Sedim. Petrology*, 1981. Vol. 51. pp. 1235-1246.
25. Tinker J., de Wit M., Grotzinger J. Seismic Stratigraphic Constraints on Neoproterozoic-Paleoproterozoic Evolution of the Western Margin of the Kaapvaal Craton, South Africa. *South Afr. Journ. of Geology*, 2002. Vol. 105. pp. 107-134.
26. Van Niekerk H. S., Beukes N. J., Gutzmer J. Post-Gondwana pedogenic ferromanganese deposits, ancient soil profiles, African land surfaces and palaeoclimate change on the Highveld of South Africa. *Journ. of Afr. Earth Sciences*, 1999. Vol. 29. pp. 761-781.
27. Varga A. R., Szakmány G. Geochemistry and provenance of the upper carboniferous sandstones from Borehole Diósziszló-3 (Téseny Sandstone Formation, SW Hungary). *Acta Mineralogica-Petrographica*, Szeged, 2004. Vol. 45 (2). pp. 7-14.
28. Varga A., Szakmány G., Árgyelán T., Józsa S., Raucsik B., Máthé Z. Complex examination of the Upper Paleozoic siliciclastic rocks from southern Transdanubia, SW Hungary – Mineralogical, petrographic, and geochemical study. In: J. Arribas, M. J. Johnsson, S. Critelli (Eds.), *Sedimentary Provenance and Petrogenesis: Perspectives from Petrography and Geochemistry*. *Geologic. Soc. of Amer. Spec. Papers*, 2007. Vol. 420. pp. 221-240.
29. Weltje G. J., Meijer X. D., De Boer P. L. Stratigraphic inversion of siliciclastic basin fills: a note on the distinction between supply signals resulting from tectonic and climatic forcing. *BasinResearch*, 1998. No. 10. pp. 129-153.
30. Yapaskurt O. V. Stage analysis of lithogenesis. Moscow. MSU, 1994. 142 p.
31. Yudovich Y. E., Ketris M. P. Mineral indicators of lithogenesis. Syktyvkar. Geoprint, 2008. 564 p.
32. Zaid S. M. Provenance, diagenesis, tectonic setting and geochemistry of Rudies (Lower Miocene), Warda Field, Gulf of Suez, Egypt. *Journ. of Afr. Earth Sciences*, 2012. Vol. 66. pp. 56-71.

ГЕОЛОГИЯ, ПОИСКИ И РАЗВЕДКА НЕФТЯНЫХ
И ГАЗОВЫХ МЕСТОРОЖДЕНИЙ

УДК 553.9; 551.242; 551.243.4

DOI: [10.46698/VNC.2020.88.37.009](https://doi.org/10.46698/VNC.2020.88.37.009)

Оригинальная статья

Сейсмотектоника высокогорной части
Восточного Кавказа и перспективы газоносности
на примере естественного проявления газа
с. Цущар (Дагестан)С. А. Мамаев^b, А. Р. Юсупов^b, А. С. Мамаев^b, З. А. Юсупов^bФГБУН Институт геологии Дагестанского научного центра РАН, Россия, 367010,
Республика Дагестан, г. Махачкала, ул. Ярагского, 75, e-mail: dangeogis@mail.ru

Статья поступила: 03.09.2020, доработана: 07.10.2020, одобрена в печать: 17.11.2020

Резюме: Актуальность работы. В данной статье даны особенности геологического строения района газопоявления «Цущар» в Кулинском районе на отложениях среднеюрского возраста, предлагается геолого-структурная схема возможного формирования залежи нефти и газа. Незначительные проявления газоносности, связанные обычно с минеральными источниками и подчиненные мощной толще юрских сланцев, развитых на значительных площадях нагорного Дагестана, начали обращать на себя внимание с 1931 г., в связи с поисками месторождений легких редких газов. Анализы газов показывают повышенное содержание легких редких газов в целом ряде месторождений нагорного Дагестана. Кроме группы месторождений Южного Дагестана известен пока только один выход горючего газа в Центральном Дагестане – Кулинском районе. На него указывает в своем рукописном отчете Дагестанскому Совнархозу геолог Н. М. Леднев. Этот выход подчинен юрским сланцам, связан с нарушениями неотектонического характера, образованными в результате сейсмической активизации региона. **Цель исследования.** Целью наших исследований является обоснование перспектив газоносности Горного Дагестана. На изучаемой территории отмечается наличие неправильных куполовидных складок с неожиданными направлениями их осей, пересекающими основное направление складчатости, частичными местными уклонениями в залегании пластов. **Методы исследования.** Основными методами исследования при изучении перспектив газоносности Горного Дагестана являлись геолого-структурный, стратиграфический, морфологический, тектонический и дешифрирование аэрофотоснимков. **Результаты исследования.** По сравнению с Предгорным Дагестаном и Прикумским районом, Горный Дагестан был подвержен более интенсивным геотектоническим движениям, неоднократно подвергался складчатости, испытал инверсию, со значительно большей амплитудой, что привело к усиленной денудации, развитию трещиноватости и разрывов, метаморфизму пород и органических образований. Все это отрицательно влияло на сохранение нефти и газа. Можно предполагать, что многие залежи, сформировавшиеся при прохождении продуцирующими толщами главной фазы нефтеобразования, были разрушены в периоды активизации тектонической деятельности на рубеже юры и мела, мела и палеогена. В дальнейшем шла генерация, преимущественно, газообразных углеводородов, которые при особенно благоприятных условиях могли сохраниться до настоящего времени. По результатам исследований можно утверждать, что газовое проявление Цущар могло проявиться в 1622, 1652 гг. в результате сильных землетрясений, эпицентр которых располагался в пределах исследуемого района.

Ключевые слова: сейсмотектоника, геологическое строение, тектонические структуры, горючий газ, Цущарское проявление, карахская свита, юрские отложения.

Для цитирования: Мамаев С. А., Юсупов А. Р., Мамаев А. С., Юсупов З. А. Сейсмотектоника высокогорной части Восточного Кавказа и перспективы газоносности на примере естественного проявления газа с. Цущар (Дагестан). *Геология и геофизика Юга России*. 2020. 10 (4): 150 – 163. DOI: 10.46698/VNC.2020.88.37.009.

Благодарности: Работа выполнена по госзаданиям Института геологии ДФИЦ РАН № НИОКТР АААА-А17-117021310202-6.

GEOLOGY, PROSPECTING AND EXPLORATION
OF OIL AND GAS FIELDS

DOI: [10.46698/VNC.2020.88.37.009](https://doi.org/10.46698/VNC.2020.88.37.009)

Original paper

Seismotectonics of the high mountain part of the Eastern Caucasus and the prospects of gas content on the example of the natural manifestation of gas in Tsuschar village (Dagestan)

S. A. Mamaev^{}, A. R. Yusupov^{}, A. S. Mamaev^{}, Z. A. Yusupov^{}

Institute of Geology, Dagestan Scientific Center, Russian Academy of Sciences,
75 Yaragskiy Str., Makhachkala 367010, Russian Federation, e-mail: dangeogis@mail.ru

Received: 03.09.2020, revised: 07.10.2020, accepted: 17.11.2020

Abstract. Relevance. This article describes the features of the geological structure of the Tsushar gas show area in the Kulinsky region on the Middle Jurassic deposits, and proposes a geological-structural diagram of the possible formation of oil and gas deposits. Minor manifestations of gas content, usually associated with mineral springs and subordinate to a thick stratum of Jurassic shales, developed over large areas of highland Dagestan, began to attract attention from 1931, in connection with the search for deposits of light rare gases. Gas analyzes show an increased content of light rare gases in a number of fields in highland Dagestan. In addition to the group of fields in Southern Dagestan, only one outlet of combustible gas in Central Dagestan is known – the Kulinsky region. It is pointed out in his handwritten report to the Dagestan Economic Council by the geologist N. M. Lednev. This outlet is subordinate to the Jurassic shale and is associated with neotectonic disturbances formed as a result of seismic activation of the region. **Aim.** The purpose of our research is to substantiate the prospects for gas content in Gorny Dagestan. In the study area, there are irregular dome-shaped folds with unexpected directions of their axes crossing the main direction of folding, partial local deviations in bedding. **Methods.** The main research methods in the study of the prospects for the gas content of Mountainous Dagestan were geological-structural, stratigraphic, morphological, tectonic and additional aerial photographs. **Research results.** Compared to Piedmont Dagestan and Prikumskiy region, Gorny Dagestan was subject to more intense geotectonic movements, repeatedly underwent folding, experienced inversion, with a much higher amplitude, which led to increased denudation, the development of fracturing and fractures, metamorphism of rocks and organic formations. All of this negatively affected the conservation of oil and gas. It can be assumed that many deposits, formed during the passage of the producing strata of the main phase of oil formation, were destroyed during periods of intensified tectonic activity at the boundary between the Jurassic and Cretaceous, Cretaceous and Paleogene. In the future, there was the generation of mainly gaseous hydrocarbons, which, under especially favorable conditions, could persist to the present day. According to the research results, it can be argued that the gas manifestation of Tsushar could have manifested itself in 1622, 1652. as a result of strong earthquakes, the epicenter, which was located within the study area.

Keywords: seismotectonics, geological structure, tectonic structures, combustible gas, Tsusharskoe occurrence, Karakh suite, Jurassic deposits.

For citation: Mamaev S. A., Yusupov A. R., Mamaev A. S., Yusupov Z. A. Seismotectonics of the high mountain part of the Eastern Caucasus and the prospects of gas content on the example of the natural manifestation of gas

in Tsuschar village (Dagestan). *Geologiya i Geofizika Yuga Rossii = Geology and Geophysics of Russian South*. (in Russ.). 2020. 10 (4): 150 – 163. DOI: 10.46698/VNC.2020.88.37.009.

Введение

Первичный тектонический рельеф области внутреннего сланцевого Дагестана сильно расчленен главными водными артериями и их притоками. Благодаря тому, что большая часть этой области сложена неметаморфизованными сланцами средней юры, легко поддающимся эрозии, эродирована и денудирована. Судя по останцам синклинальных плато, сложенных сверху верхнеюрскими известняками, положительные формы тектонического рельефа (антиклинали), которые были сложены сверху более молодыми верхнемеловыми и палеогеновыми отложениями, находились выше современного уровня, на 1000 с лишним метров, т. е. в результате процессов денудации, горы здесь снизились более чем на 1000 метров по сравнению с современным уровнем. Доминирующими в орографии местности формами рельефа являются водоразделы реки Казикумухское койсу. Крупными отрицательными формами рельефа являются долины названной реки, межгорная котловина (Казикумухская). На участках пересечения толщ жестких пород (песчаников), образованы глубокие каньоны: Казикумухский, Магудере и другие. Благодаря тому, что в породах, слагающих эту область, преобладают неметаморфизованные сланцы средней юры, характерной чертой этой области являются мягкие очертания рельефа (в основном). На полосе распространения чередующихся пачек, слоев песчаников и сланцев и мощных пластов песчаников, характерны ступенчатые формы рельефа с порогами по рекам. Еще одной отличительной чертой этой области является бурное развитие оползней и селевых потоков во время обильных дождей, которые часто приводят к изменению рельефа, ландшафтов и большим разрушениям [Идрисов и др., 2013]. Многие древние оползни не только являются памятниками природы, но и имеют историческое значение. Уникальным явлением природы этой области (Кулинский район, селение Цущар) является газовое проявление возле селения Цущар. Данное проявление изучалось многими исследователями, начиная с начала прошлого века. Некоторыми геологами данное газовое проявление отнесено к памятникам природы и даны положительные перспективы поисков.

В последние годы нефтяные и газовые залежи открыты в ряде горноскладчатых сооружений: Карпаты, Кавказ (Краснодарский край и Грузия), Копетдаг и др. Нефтяные месторождения открыты в районе Загросского хребта (Иран), где они расположены на отметках свыше 3000 м (Саркан, Дудру, Шуром и др.).

Цель работы

На перспективы поисков залежей нефти и газа в Горном Дагестане указывали многие исследователи [Голубятников, 1935, 1938; Геология и нефтегазоносность..., 1958; Голубятников, Пустовалов, 1959; Дробышев, 1932, 1941; Коршенбаум, 1977; Куприн, 1959; Мирзоев, Ланда, 1976; Акаев, Бунин, 1977; Бунин, 1982; Бражник, Смирнова, 1985; Короновский, 1987; Соколов, Соборнов, 1988; Shilin et al., 2004; Cooper, 2007; Roeder, 2010; Popkov, 2011] и предлагали конкретные структуры для проведения разведочных работ. Также была выделена восточная часть северного крыла мегаантиклинория Большого Кавказа в качестве Восточно-Кавказской воз-

мальной перспективной области (или самостоятельного района) с качественной оценкой. Целью наших исследований является обоснование перспектив газоносности Горного Дагестана. В Дагестанском секторе северного крыла мегаантиклинория Большого Кавказа развиты породы, способные продуцировать и аккумулировать углеводороды, тектонические условия благоприятствуют формированию ловушек, широко распространенные сероводородные источники свидетельствуют о восстановительных геохимических условиях в погруженных горизонтах [Успенская, 1932; Хаин, 1968]. Кроме названных положительных факторов возможной продуктивности мезозойских отложений Горного Дагестана есть и прямые признаки нефтегазоносности: многочисленные выходы горючих газов, относящихся к группе углеводородных газов метанового ряда. Наиболее известным является выход газа у сел. Цущар, который действует несколько столетий (рис. 1). Этот выход, приуроченный к юрским сланцам, относится к Бейбулатскому синклинию, который является зоной устойчивого прогибания начиная с верхнего аалена до верхней юры. В этом районе работы велись с целью уточнения геологических условий естественного газопроявления. Изотопный состав углерода по данным Э. М. Галимова показал, что газ из естественного выхода Цущар относится к нефтяному ряду [Акаев, Каспаров, 1976; Виноградов, Галимов, 1970; Галимов и др., 1970]. В газе содержится незначительное количество гелия [Маммаев, 2006; Газалиев, 2017].

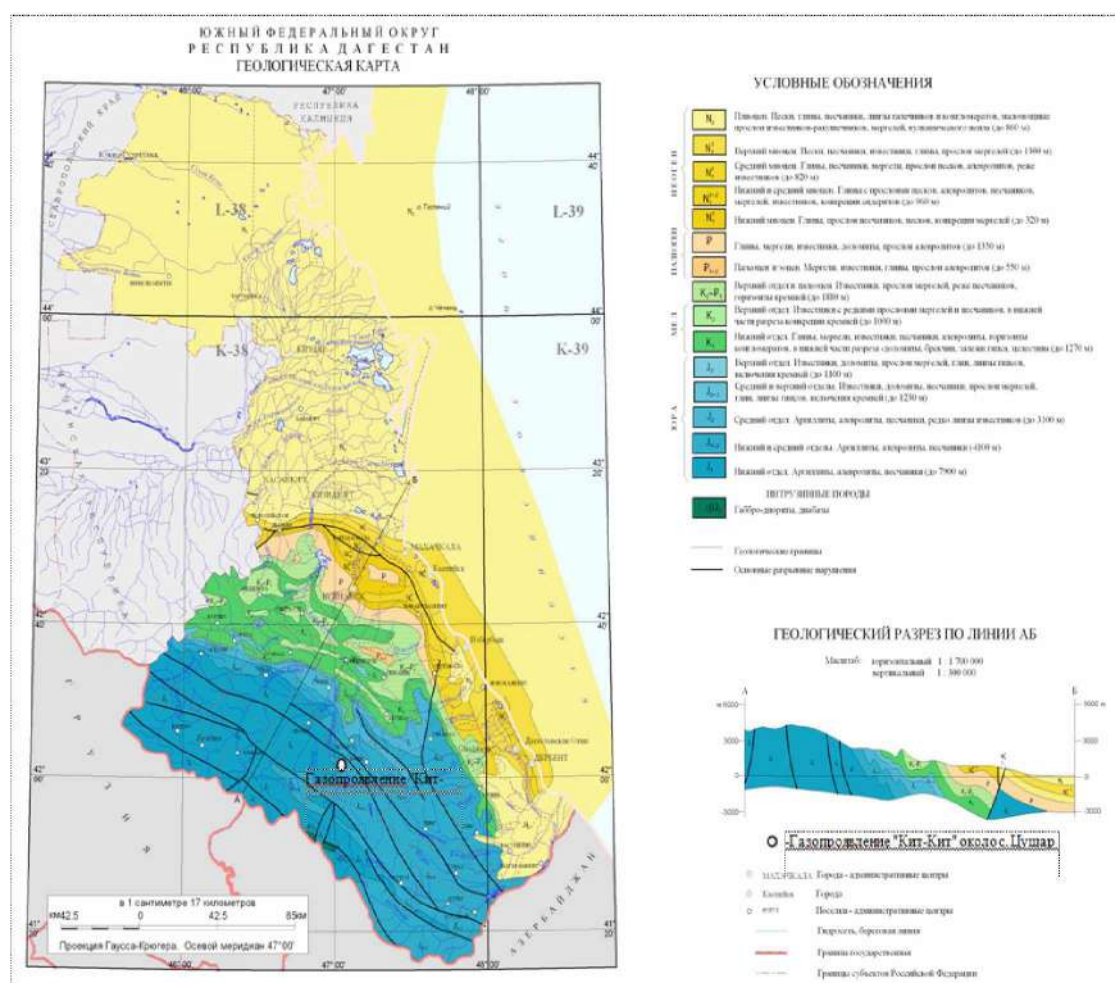


Рис. 1. Геологическая карта Республики Дагестан. /
Fig. 1. Geological map of the Republic of Dagestan.

Методы исследования

Наряду с другими критериями при оценке перспектив нефтегазоносности одним из основных является наличие благоприятных структур для размещения в них газа. В этом отношении весьма интересным является рассматриваемый нами район Горного Дагестана.

Основными методами исследования при изучении перспектив газоносности Горного Дагестана являлись геолого-структурный, стратиграфический, морфологический, тектонический и дешифрирование аэрофотоснимков. На основании этих методов были построены структурно-тектонические и стратиграфические схемы, профили и разрезы.

Результаты исследования

По данным В. Д. Голубятникова и И. Ф. Пустовалова, описываемый район представляет собой моноклинал, осложненную взбросом с резким заворотом слоев вдоль плоскости сместителя. Породы опущенной части моноклинали имеют крутое падение (до $70-80^\circ$) и к северо-востоку постепенно выполаживаются (до $20-30^\circ$).

В описываемом районе имеют распространение в основном отложения среднеюрского возраста и лишь в западной ее части выходят на дневную поверхность отложения нижней юры [Магомедов, Мамаев, 2019]. При этом коренные юрские породы покрыты четвертичными отложениями, задернованы, что затрудняет их геолого-структурное расчленение [Дотдугев, 1986; Маркус, 1984; Милановский, Хаин, 1963].

Результаты съемочных работ позволили осветить некоторые детали геологического строения, а построенные схематическая геологическая карта в масштабе 1:25 000 и геологические профильные разрезы – проследить распространение и границы не только четырех основных свит (ири, карахской, хивской и кумухской), но и четырех подразделов карахской свиты: одного нижнекарахского ($I_{1a_2}kr_1^1$) и трех верхнекарахского ($I_{2a_2}kr_2^1$, $I_{2a_2}kr_2^2$ и $I_{2a_2}kr_2^3$), отличающихся по преобладающему составу и типу переслаивания.

На составленной схематической геологической карте (рис. 2) четко прослеживаются три поля (блока) северо-западного простирания, контакты между которыми имеют тектоническую природу. В целях количественной оценки абсолютной гипсометрии отдельных блоков и выявленных локальных структур нами была построена еще схематическая геолого-структурная карта, а в качестве опорного репера избрана подошва нижнего аалена или кровля свиты ири. Также как и на схематической геологической карте, на схематической геолого-структурной карте четко различаются вышеуказанные три поля: юго-западное, центральное и северо-восточное (рис. 2).

Юго-западное поле (рис. 3) представляет собой взброшенное (или надвинутое) крыло коробчатого антиклинория, сложенное наиболее древними подразделениями разреза: свита ири ($I_{1tr_3}ir$), нижнекарахская свита ($I_{1a_1}kr_1^1$) и нижняя часть верхнекарахской свиты ($I_{2a_2}kr_1^1$). По абсолютному уровню залегания, репиональным уклонам и градиенту уклонов весь юго-западный блок по кровле свиты ири залегает выше нулевой отметки. Региональные уклоны направлены в сторону смежных антиклиналей. Максимальная амплитуда подъема крыла антиклинория отмечается в пределах свода Буршинской антиклинали, где абсолютная отметка кровли свиты

при составляет более +3000 м. Бухтынская антиклиналь, расположенная к юго-востоку от последней также имеет горстообразное строение, но ее абсолютная отметка не превышает +1500 м.

Центральное поле (рис. 3) занимает полностью верхняя глинистая часть верхнекарахской свиты ($J_2a_2kr_2^3$) и резко отличается от юго-западного поля почти горизонтальным залеганием маркирующей поверхности на уровне –250 м, –500 м, т. е. ниже нулевой отметки. На этом фоне локальные антиклинали оконтуриваются отметками –250 м., а локальные синклинали –500 м. При этом максимальная амплитуда надвигания юго-западного крыла антиклинория на сводовый грабен-синклиний составляет 3000 м (против сводовой части Буршинской антиклинали), далее размах резко сокращается и против Бухтынской антиклинали он составляет до 1000 м.

Наиболее наглядно вышеотмеченные структуры представлены в составленной авторами статьи тектонической схеме (рис. 4), которая дополняется и увязывается с нашими полевыми материалами. Так, эти структуры находятся в области Бейбулакского синклиния, расположенного между антиклинориями Бокового хребта на юго-западе и Уллучаринским – на северо-востоке.

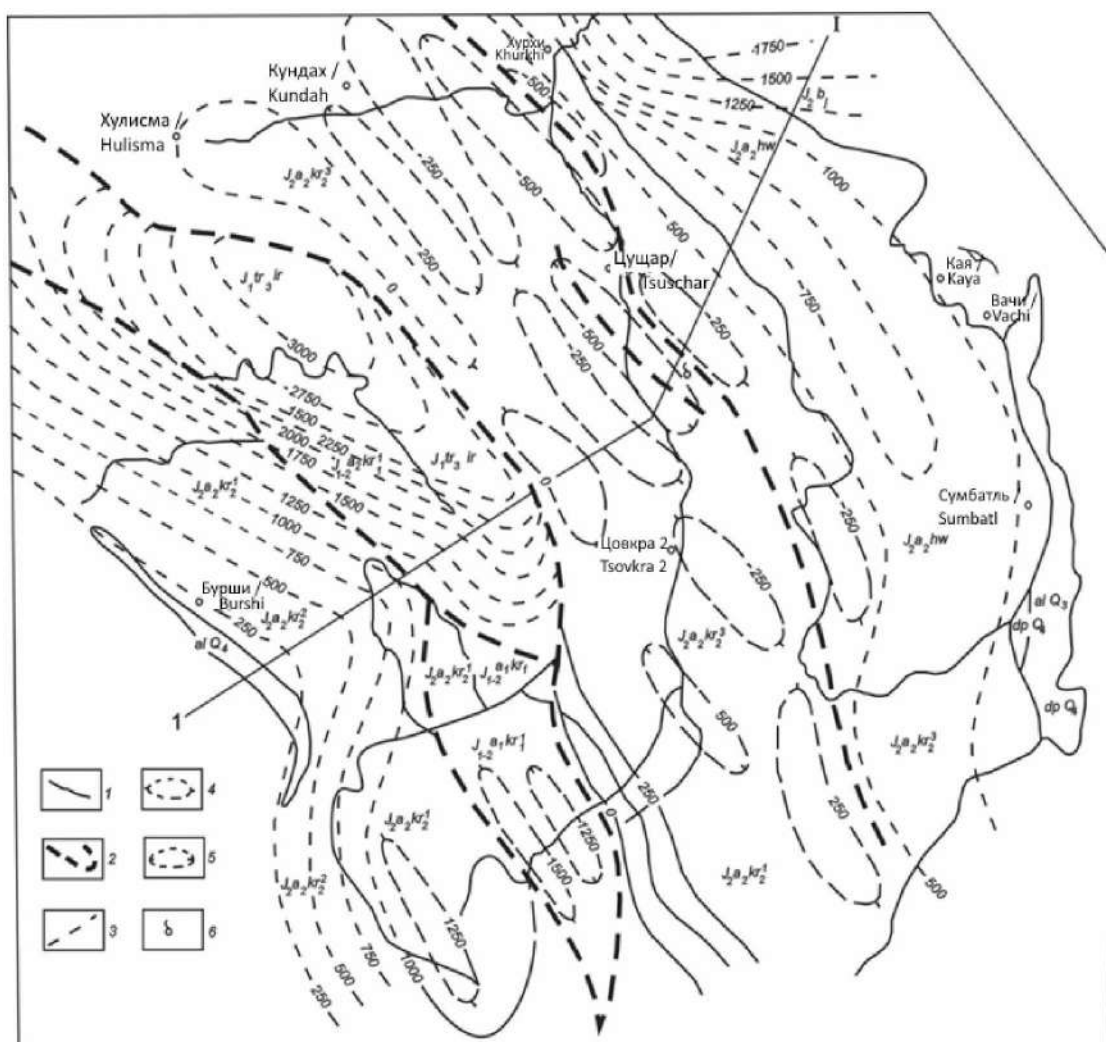


Рис. 2. Схематическая геологическая карта района с. Цушар. /
Fig. 2. Schematic geological map of the area of the village of Tsushar.

Северо-восточное поле (рис. 3) сложено наиболее молодыми свитами: хивской ($I2a^2hw$), кумухской ($I2bj$) и частично глинистой верхнекарахской ($I1a^2kr11$), и представляет собой крыло коробчатого антиклинория также надвинутое на центральное поле. Северо-восточный блок, являясь крылом антиклинория, круто погружается, начиная с отметки -250 м., -500 м до отметки -1750 м, в сторону смежной Кумухской синклинали. Амплитуда надвигания северо-восточного крыла на центральный блок меньше 250 м и поэтому на геологической карте не проявляется.

Вышеуказанные три поля отличаются по глубине денудационного среза и соответственно масштабу вертикальных движений. Поверхность надвигов имеет крутое залегание, поэтому центральное поле имеет грабенообразное строение. Отсутствие в последнем наиболее молодых свит – хивской и кумухской – свидетельствует о том, что грабен первоначально занимал более высокое структурное положение и эти свиты были размыты. Максимальный денудационный срез в пределах юго-западного поля объясняется асимметричным строением коробчатой антиклинали. Вертикальные движения в новейшее время с максимальной интенсивностью проявились по субвертикальным плоскостям взбросов-надвигов, что привело к отставанию центрального блока и сохранению его от глубокого эрозионного среза. В результате формируется особый тип обращенной морфоструктуры, который отличается от классического тем, что отрицательный рельеф в сводовой части не совпадает с областью максимального денудационного среза (последняя перемещается на юго-западное крыло). Указанный тип обращенной морфоструктуры формируется под влиянием тектонического опускания сводового блока – один из вариантов обращенного рельефа [Милановский, 1968; Семов, 1980; Хаин, Михайлов, 1985; Шолпо, 1964; May, 1991; Sagy Yael, 2016; Pelet, 1985; Bazhenova et al., 2002; Burshta et al., 1970; Chepak et al., 1983, 1998].

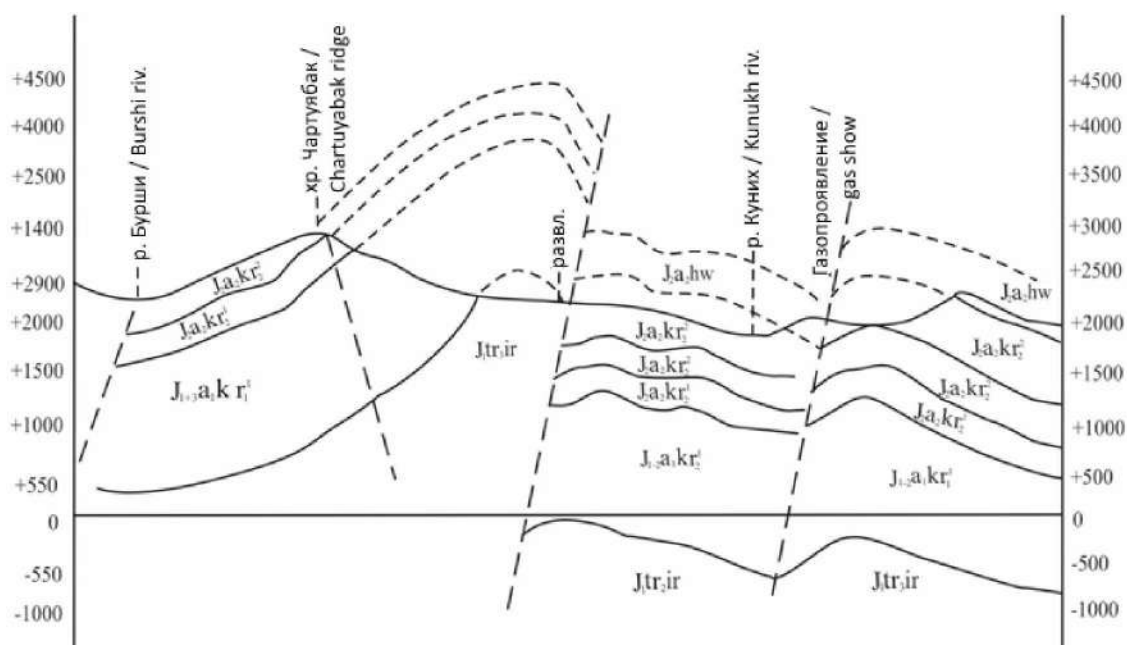


Рис. 3. Схематическая геолого-структурная карта района с. Цушар. /
Fig. 3. Schematic geological-structural map of the area of the village of Tsushar.

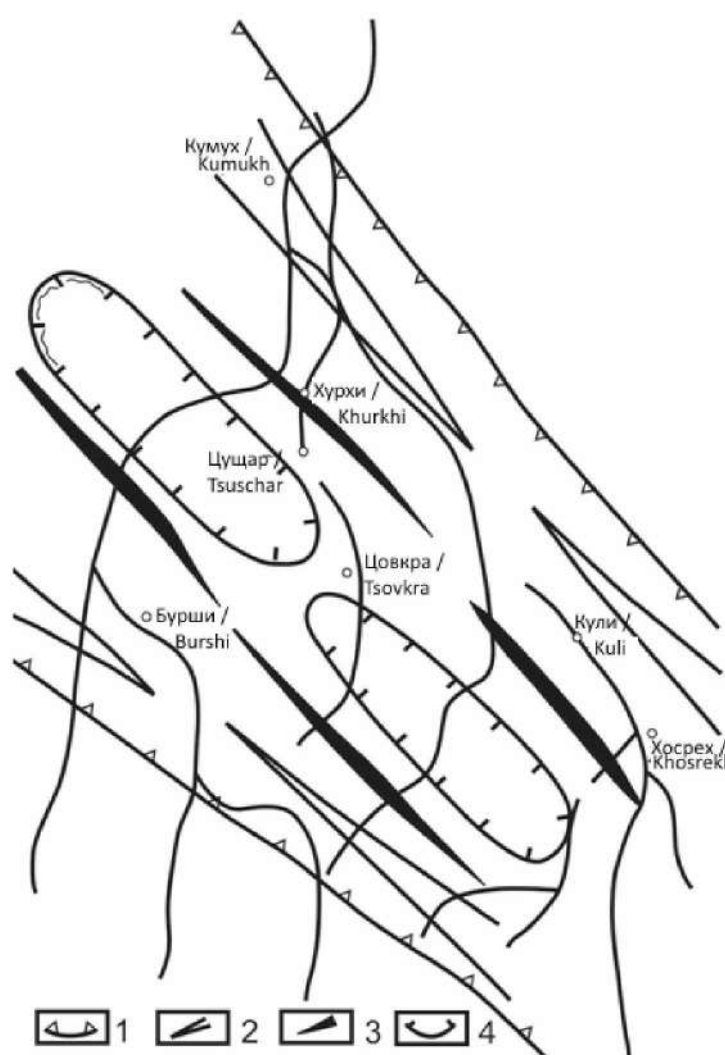


Рис. 4. Тектоническая карта района с. Цущар.

1 – граница антиклинория; 2 – синклинали; 3 – антиклинали; 4 – грабени./

Fig. 4. Tectonic map of the area of the village of Tsushar.

1 – anticlinorium border; 2 – synclines; 3 – anticlines; 4 – robbery.

По элементам залегания всех трех вышеуказанных блоков можно оконтурить мелкие структурные формы в виде узких антиклиналей и синклиналей.

В пределах Бейбулакской синклинали структурные формы несколько затусованы вследствие частичной инверсии прогиба. Этим объясняется тот факт, что на всех тектонических схемах этот район не имеет четкой и ясной интерпретации. Однако наши исследования показали, что в осевой части миогеосинклинального прогиба простирается антиклинорий, названный нами Цущар-Цовкринским, который при детальном изучении выявил черты строения, в принципе ничем не отличающиеся от унаследованных антиклинорий, развитых на месте интрагеоантиклиналей. В целом названный антиклинорий также представляет собой коробчатую структуру широким сводом. На крыльях ее образуются антиклинальные перегибы в виде узких линейных антиклиналей: Хурхи-Хосрехской на северо-востоке и Бурши-Бухтынской на юго-западе.

Сводовая часть Цущар-Цовкринского-антиклинория опущена по системе сбросов и надвигов, образуя грабен-антиклинорий (центральный блок) или обращен-

ную морфоструктуру. При детальном рассмотрении выявляются две обращенные морфоструктуры, кулисообразно сочлененные, названные нами Цущарская и Цовкринская.

Из дизъюнктивных нарушений следует выделить крупный взброс, прослеживаемый в 1,0 км южнее с. Хулирма, по которому породы нижнекарабахской свиты приведены в контакт с верхней частью карабахской свиты. Амплитуда взброса около 1500 м. Плоскость сместителя падает к юго-западу под углом 40° .

Второй крупный разрыв проходит в 0,5-0,7 км юго-восточнее с. Хурхи по дороге в с. Цущар у моста через р. Кунниш. Разрыв представлен целой зоной нарушенных пород, с подворотом слоев за счет перемещения по плоскостям сместителя. Падение сместителя к северо-востоку под углом $80-87^\circ$, местами до 54° .

Значительная зона дробления отмечается также к югу от сел. Цущар, которая протягивается в сторону Цущарского газопромысла.

Дизъюнктивные нарушения типа надвигов характерны для сводовой части инверсионного Цущар-Цовкринского антиклинория, благодаря чему крылья коробчатых структур в виде линейных антиклиналей надвинуты на сводовый грабен.

В пределах исследованной площади Цущар-Цовкринский грабен-антиклинорий протягивается на 16,0 км, а в поперечном сечении самая узкая его часть равна 3,0 км. В свою очередь в нем выделяется ряд мелких антиклиналей и синклиналей размерами 3,5х0,5 км; 4,0х0,5 км и т. д. В целом сводовый грабен следует отнести к высокоперспективной территории, имея в виду его присводовое положение, запечатанность по надвигам и новейшее опускание. На месте Бейбулакского синклинория, по данным Н. К. Поливоды (1972 г.), показан глубокий прогиб фундамента (до 10 км). При такой глубине можно полагать по аналогии с Предгорным прогибом, что под юрскими отложениями можно встретить толщу триаса мощностью от 3,0 до 5,0 км. [Семов, 1980]. Характерно, что подобно Предгорному прогибу Бейбулакский прогиб испытал лишь частично инверсию, поэтому его перспективы в отношении газоносности должны оцениваться очень высоко, так как залежи углеводородов в нем не подверглись разрушению. Частичная инверсия, напротив, способствовала заложению в осевой части прогиба антиклинория, который играет роль зоны газонакопления.

Для условий сохранности возможных залежей газа необходимо наличие непроницаемых покрышек [Жгенти и др., 1983]. Роль покрышки в описываемом районе выполняют глинистые породы аалена, выходящие на дневную поверхность, являющиеся экраном для нижезалегающих отложений нижней юры и триаса. Лабораторные исследования показали, что глинистые породы аалена являются непроницаемыми с низкой пористостью.

Некоторые исследователи [Леднев, 1926; Лебедев, 1978; Неругев и др., 1969; Никитин, 1987; Соколов, Хаин, 1982] отмечают, что наличие дизъюнктивных нарушений (сбросов, взбросов, надвигов) не всегда являются причиной разрушения залежей, а в большинстве случаев они выполняют роль экрана, покрышки. Таким образом, наличие дизъюнктивных нарушений на территории центрального блока не должно служить основанием к снижению оценки перспектив ее газоносности. В связи с вышеописанными структурными условиями района сел. Цущар перспективы газоносности на данной площади связываются с отложениями нижней юры и триаса (рис. 1).

Заключение

Вышеизложенный материал позволил выделить восточную часть северного крыла мегаантиклинория Большого Кавказа в качестве Восточно-Кавказской возможной перспективной области (или самостоятельного района) с качественной оценкой. Дальнейшие работы связываются с обоснованием перспектив газоносности Горного Дагестана, для чего необходимы комплексные геологические исследования с проведением структурного бурения, которые должны наметить объекты для заложения глубоких разведочных скважин и обосновать положение параметрических скважин с вскрытием пород палеозойского возраста. Кроме того предлагается провести изучение Горного Дагестана глубоким сейсмическим зондированием, что позволит уточнить существующие представления о глубинном строении Дагестана/

Литература

1. Акаев Б. А., Бунин Г. Г. Структурные предпосылки газоносности района Цущар Горного Дагестана. // Сб. Тр. ИГ Даг ФАН СССР. Новые данные по геологии и нефтегазоносности Дагестана. – 1977. – Вып. 1 (10). – С. 101-107.
2. Акаев Б. А., Каспаров С. А. Сравнительный анализ развития системы прогибов центральной и юго-восточной частей Кавказа в связи с оценкой их нефтегазоносности. // Нефть и газ. – 1976. – № 2.
3. Бражник В. М., Смирнова М. Н. К вопросу строения верхней мантии и нижних горизонтов земной коры Северо-Восточного Предкавказья. // В сб.: Сейсмичность и сейсмоструктура Восточного Предкавказья. – Махачкала. – 1985. – Вып. 33. – С. 69-76.
4. Бунин Г. Г. Особенности строения Большого Кавказа, выполненные по космическим снимкам. // Исследования земли из космоса. – 1982. – № 4. – С. 26-32.
5. Виноградов А. П., Галимов Э. М. Изотопия углерода и проблема происхождения нефти. // Геохимия. – 1970. – № 3. – С. 275-296.
6. Газалиев И. М. Формирование газового состава подземных вод Дагестана по изотопным данным углерода, гелия и аргона. // Труды Института геологии Дагестанского научного центра РАН. – 2017. – Вып. 4 (71). – С. 79-90.
7. Галимов Э. М., Ивлев А. А., Кузнецова Н. Г. Изотопный состав углерода газообразных углеводородов в нефтях и некоторые вопросы их генезиса. // Геохимия. – 1970. – № 7. – С. 818-828.
8. Геология и нефтегазоносность Восточного Предкавказья. (Тр. КЮГЭ. Вып. 1). / Ред. И. О. Брода. – Л.: Гостоптехиздат, 1958. – 365 с.
9. Голубятников В. Д. Месторождения природных газов ДАССР. // В сб.: «Природные богатства Северо-Кавказского края». – Пятигорск. – 1935. – 550с.
10. Голубятников В. Д. Новые возможные газоносные и нефтеносные районы Южного Дагестана. // Тр. по геол. и полезн. ископ. Сев. Кавказа. Сб. 1. – Ростов-на-Дону. – 1938. – С. 8-17.
11. Голубятников В. Д., Пустовалов И. Ф. Геологическая карта горной части ДАССР: Объяснительная записка. – М. – 1959. – 59 с.
12. Дотдугев С. И. О покровном строении Большого Кавказа. // Геотектоника. – 1986. – № 5. – С. 94-106.
13. Дробышев Д. В. К исследованию месторождения газа в юрских отложениях южного Дагестана. // Сборник «За природные газы». – 1932. – 78 с.
14. Дробышев Д. В. Перспективы нефтегазоносности отложений мезозоя на северном склоне Кавказа. // Сб. Нефтеносность мезозойских отложений Большого Кавказа. Тр. ИГРИ, нов. сер. – 1941. – Вып. 14. – 220с.
15. Жгенти Т. Г., Холодилов В. В., Крысанова Л. В. Коллекторские свойства продуктивных пород палеозойского фундамента Дагестана. // В тезисах докл. Коллекторы нефти и газа на больших глубинах. – М. – 1983. – С. 64-66.

16. Идрисов И. А., Мамаев С. А., Ибаев Ж. Г. Особенности распространения и развития крупных оползней Дагестана. // Труды Института геологии Дагестанского научного центра РАН. – 2013. – № 62. – С. 96-100.
17. Короновский Н. К. и др. История геологического развития и формирования структуры центральной части Терско-Каспийского передового прогиба. // Сб. Геология и полезные ископаемые Большого Кавказа. – М.: Наука, 1987. – С. 147-174.
18. Коршенбаум Ф. М. Формирование юрской структуры Восточной антиклинальной зоны Дагестана. // Сб. Тр. ИГ Даг ФАН СССР. Новые данные по геологии и нефтегазоносности Дагестана. – 1977. – Вып. 1 (10). – С. 72-77.
19. Куприн П. Н. Нефтегазоносность Восточной антиклинальной зоны. // Тр. КЮГЭ АН СССР. – 1959. – Вып. 4. – С. 149-323.
20. Лебедев Л. И. Строение и нефтегазоносность гетерогенных депрессий. – М.: Наука, 1978. – 111 с.
21. Магомедов Р. А., Мамаев С. А. Некоторые результаты исследований геотектонических условий и современной сейсмичности Восточного Кавказа. // Геология и геофизика Юга России. – 2019. – Т. 9, № 1. – С. 29-42.
22. Маммаев О. А. Подземные воды Восточного Предкавказья (формирование, гидрогеохимия и процессы радиотеплогенерации). // О. А. Маммаев; Российская акад. наук, Дагестанский науч. центр, Институт проблем геотермии и Институт геологии. – Махачкала. – 2006. – 280 с.
23. Маркус М. А. Геологическое строение Восточного Кавказа в юре. // Геотектоника. – 1984. – № 3. – С. 53-68.
24. Милановский Е. Е. Новейшая тектоника Кавказа. – М.: Недра, 1968. – 482 с.
25. Милановский Е. Е., Хаин В. Е. Геологическое строение Кавказа. – М.: Изд. МГУ, 1963. – 357 с.
26. Мирзоев Д. А., Ланда Е. М. О времени формирования залежей углеводородов в Дагестане. // Время формирования залежей нефти и газа. – М.: Недра, 1976.
27. Леднев Н. Геологическое исследование в окрестностях г. Махачкала. // Нефтяное Хоз. – 1926. – № 11-12.
28. Неругев С. Г., Двали М. Ф., Кротова В. А., Успенский В. А., Богомолов А. И. Поисковые критерии прогноза нефтегазоносности. – М.: Недра, 1969. – 223 с.
29. Никитин М. Ю. Неотектоника Восточного Кавказа. // Бюлл. МОИП. – 1987. – Т. 62. – Вып. 3. – С. 21-36.
30. Семов В. Н. Глубинное строение Юга СССР. – М.: Недра, 1980. – 228 с.
31. Соколов Б. А., Хаин В. Е. Нефтегазоносность складчатых горных сооружений. // Советская геология. – 1982. – № 12. – С. 53-58.
32. Соколов Б. А., Соборнов К. О. Дагестанский пояс надвигов: строение и нефтегазоносность. // Сб. ст. Состояние и пути повышения эффективности разведки и освоения месторождений нефти и газа в Дагестане. Тр. ИГ ДагФАН СССР. – Махачкала. – 1988. – Вып. 37. – С. 41-46.
33. Успенская Н. Ю. Горючие газы Нагорного Дагестана. // Нефть. – 1932. – № 2.
34. Хаин В. Е. История геологического развития. Геология СССР, т. IX, Северный Кавказ. – М.: Недра, 1968. – 760 с.
35. Хаин В. Е., Михайлов Е. М. Общая геотектоника. – М.: Недра, 1985. – 326 с.
36. Шолпо В. Н. Типы и условия формирования складчатости Сланцевого Дагестана. – М.: Наука, 1964. – 167 с.
37. Bazhenova O. K., Fadeeva N. P., Sen-Zhermes M. L. et al. Biomarkers of organic matter and oils of the Maikop series of the Caucasus-Scythian region. // *Geohimiya = Geochemistry*. – 2002. – No. 9. – pp. 993-1008. (In Russ.)
38. Burshtar M. S., Shvemberger Yu. N. The deposits of the Maikop series of the Eastern Pre-Caucasus region as a possible reserve for the discovery of new oil and gas fields. // *Proceedings VNIGNI*. – 1970. – Is. 100. – pp. 98-110. (In Russ.)

39. Chepak G. N., Shaposhnikov V. M. Peculiarities of the oil content of the clayey strata of the Oligocene of the Eastern Ciscaucasia. // *The geology of oil and gas*. – 1983. – No. 4. – pp. 36-40. (In Russ.)
40. Chepak G. N., Skripkin A. P., Kovalev N. I. Syngenetic deposits of oil in the Paleogene sediments of the Eastern Trans-Caucasus. // *Ser. «Oil and gas»: Coll. papers*. – Stavropol. – 1998. – No. 1. (In Russ.)
41. Cooper M. Structural style and hydrocarbon prospectivity in fold and thrust belts: a global review. // *Ries A. C., Butler R. W. & Graham R. H. Deformation of the Continental Crust: The Legacy of Mike Coward*. Geological Society. – London. – 2007. – Vol. 272. – pp. 447-472.
42. May P. R. The Eastern Mediterranean basins: evolution and oil habitat. // *AAPG Bulletin*. – 1991. – Vol. 75. – pp. 1215-1232.
43. Pelet R. Evaluation quantitative des produits formés lors de l'évolution géochimique de la matière organique. // *Rev. d'Institut Français du Pétrole*. – 1985. – Vol. 40. – No. 5. – pp. 551-562.
44. Popkov V. I. Collision tectonics of the north-western Caucasus. // *Natural Cataclysms and Global Problems of the Modern Civilization. Book of abstracts the of World Forum – International Congress, September 19-21, Istanbul, Turkey – SWB*. London. – 2011. – pp. 78-79.
45. Roeder D. Fold-thrust belts at Peak Oil. // *In Goffey G. P., Craig J., Needham T., Scott R. (eds) Hydrocarbons in contractual belts*. Geological Society, London. – 2010. – Vol. 348. – pp. 7-31.
46. Sagy Yael. Tectono-sedimentary processes in the deep Levant basin. // *Dissertation*. Tel-Aviv university. – 2016. – 136 p.
47. Xu Shilin, Lu Xiuxiang, Sun Zhonghua, Pi Xuejun, Liu Luofu, Li Qiming, Xie Huiwen. Kela-2: a major gas field in the Tarim Basin of west China. // *Petroleum Geoscience*. – 2004. – Vol. 10. – pp. 95-106.

References

1. Akaev B. A., Bunin G. G. Structural preconditions for the gas content of the Tsushar region of Gorny Dagestan. In: *Sb. Tr. IG Dag FAN SSSR. New data on the geology and oil and gas content of Dagestan, 1977. Issue. 1 (10)*. pp. 101-107. (In Russ.)
2. Akaev B. A., Kasparov S. A. Comparative analysis of the system development of troughs in the central and southeastern parts of the Caucasus in connection with the assessment of their oil and gas content. *Oil and gas*, 1976. No. 2. (In Russ.)
3. Brazhnik V. M., Smirnova M. N. To the question of the structure of the upper mantle and lower horizons of the earth's crust in the North-Eastern Ciscaucasia. In: *Proceedings Seismicity and seismotectonics of the Eastern Ciscaucasia*. Makhachkala, 1985. Issue. 33. pp. 69-76. (In Russ.)
4. Bunin G. G. Features of the structure of the Greater Caucasus, made according to satellite images. *Research of the earth from space*, 1982. No. 4. pp. 26-32. (In Russ.)
5. Vinogradov A. P., Galimov E. M. Carbon isotopy and the problem of the oil origin. *Geochemistry*, 1970. No. 3. pp. 275-296. (In Russ.)
6. Gazaliev I. M. Formation of the gas composition of groundwater in Dagestan according to isotopic data of carbon, helium and argon. In: *Proceedings of the Institute of Geology of the DSC RAS, 2017. Issue 4 (71)*. pp. 79-90. (In Russ.)
7. Galimov E. M., Ivlev A. A., Kuznetsova N. G. Carbon isotopic composition of gaseous hydrocarbons in oils and some questions of their genesis. *Geochemistry*, 1970. No. 7. pp. 818-828. (In Russ.)
8. *Geology and oil and gas content of the Eastern Ciscaucasia*. In: *Proceedings of KYuGE*. Issue 1. Leningrad. Gostoptekhizdat, 1958. 365 p. (In Russ.)
9. Golubyatnikov V. D. Deposits of natural gases of DASSR. In: *Proceedings "Natural wealth of the North Caucasian region"*. Pyatigorsk, 1935. 550 p. (In Russ.)
10. Golubyatnikov V. D. New possible gas and oil bearing regions of Southern Dagestan. In: *"Tr. po geol. i polezn. iskop. Sev. Kavkaza. Sb. 1"*. Rostov-on-Don, 1938. pp. 8-17. (In Russ.)

11. Golubyatnikov V. D., Pustovalov I. F. Geological map of the mountainous part of DASSR: Explanatory note. Moscow, 1959. 59 p. (In Russ.)
12. Dotduev S. I. On the overlapped structure of the Greater Caucasus. *Geotectonics*, 1986. No. 5. pp. 94-106. (In Russ.)
13. Drobyshev D. V. To the study of a gas field in the Jurassic deposits of southern Dagestan. In: Proceedings "For natural gases", 1932. 78 p. (In Russ.)
14. Drobyshev D. V. Prospects for the oil and gas potential of the Mesozoic deposits on the northern slope of the Caucasus. In: Proceedings Oil-bearing capacity of Mesozoic deposits of the Greater Caucasus. "Tr. IGRI., nov. ser.", 1941. Issue. 14. 220 p. (In Russ.)
15. Zhgenti T. G., Kholodilov V. V., Krysanova L. V. Reservoir properties of productive rocks of the Paleozoic basement of Dagestan. In: Book of abstracts Oil and gas reservoirs at great depths. Moscow, 1983. pp. 64-66. (In Russ.)
16. Idrisov I. A., Mamaev S. A., Ibaev Zh. G. Features of the distribution and development of large landslides in Dagestan. In: Proceedings of the Institute of Geology of the DSC RAS, 2013. No. 62. pp. 96-100. (In Russ.)
17. Koronovskii N. K. et al. History of geological development and formation of the structure of the central part of the Terek-Caspian foredeep. In: *Geology and minerals of the Greater Caucasus*. Moscow, Nauka, 1987. pp. 147-174. (In Russ.)
18. Korshenbaum F. M. Formation of the Jurassic structure of the Eastern anticlinal zone of Dagestan. In: "Sb. Tr. IG Dag FAN SSSR". New data on the geology and oil and gas content of Dagestan, 1977. Issue. 1 (10). pp. 72-77. (In Russ.)
19. Kuprin P. N. Oil and gas potential of the Eastern anticlinal zone. In: "Tr. KYuGE AN SSSR", 1959. Issue. 4. pp. 149-323. (In Russ.)
20. Lebedev L. I. Structure and oil and gas content of heterogeneous depressions. Moscow, Nauka, 1978. 111 p. (In Russ.)
21. Magomedov R. A., Mamaev S. A. Some results of studies of geotectonic conditions and modern seismicity of the Eastern Caucasus. *Geology and Geophysics of Russian South*, 2019. Vol. 9. No. 1. pp. 29-42. (In Russ.)
22. Mammaev O. A. Groundwaters of the Eastern Ciscaucasia (formation, hydrogeochemistry, and radio heat generation processes). RAS DSC Institute of Geothermal Problems and Institute of Geology. Makhachkala, 2006. 280 p. (In Russ.)
23. Markus M. A. Geological structure of the Eastern Caucasus in the Jurassic. *Geotectonics*, 1984. No. 3. pp. 53-68. (In Russ.)
24. Milanovsky E. E. The latest tectonics of the Caucasus. Moscow. Nedra, 1968. 482 p. (In Russ.)
25. Milanovsky E. E., Khain V. E. Geological structure of the Caucasus. Moscow. Moscow State University, 1963. 357 p. (In Russ.)
26. Mirzoev D. A., Landa E. M. About the time of formation of hydrocarbon deposits in Dagestan. In: Time of formation of oil and gas deposits. Moscow. Nedra, 1976. (In Russ.)
27. Lednev N. Geological research in the vicinity of Makhachkala. *Oil Economy*, 1926. No. 11-12. (In Russ.)
28. Nerugev S. G., Dvali M. F., Krotova V. A., Uspenskii V. A., Bogomolov A. I. Search criteria for forecasting oil and gas content. Moscow. Nedra, 1969. 223 p. (In Russ.)
29. Nikitin M. Yu. Neotectonics of the Eastern Caucasus. *Bull. MOIP*, 1987. Vol. 62. Issue 3. pp. 21-36. (In Russ.)
30. Semov V. N. Deep structure of the South of the USSR. Moscow. Nedra, 1980. 228 p. (In Russ.)
31. Sokolov B. A., Khain V. E. Oil and gas content of folded mountain structures. *Soviet Geology*, 1982. No. 12. pp. 53-58. (In Russ.)
32. Sokolov B. A., Sobornov K. O. Dagestan thrust belt: structure and oil and gas content. In: Proceedings State and ways of increasing the efficiency of exploration and development of oil and gas fields in Dagestan. Makhachkala, 1988. Issue 37. pp. 41-46. (In Russ.)

33. Uspenskaya N. Yu. Combustible gases of Nagorny Dagestan. *Neft'*, 1932. No. 2. (In Russ.)
34. Khain V. E. History of geological development. *Geology of the USSR*, Vol. 1X, North Caucasus. Moscow. Nedra, 1968. 760 p. (In Russ.)
35. Khain V. E., Mikhailov E. M. General geotectonics. Moscow. Nedra, 1985. 326 p. (In Russ.)
36. Sholpo V. N. Types and conditions for the formation of folding in Shale Dagestan. Moscow, Nauka, 1964. 167 p. (In Russ.)
37. Bazhenova O. K., Fadeeva N. P., Sen-Zhermes M. L. et al. Biomarkers of organic matter and oils of the Maikop series of the Caucasus-Scythian region. *Geokhimiya = Geochemistry*, 2002. No. 9. pp. 993-1008. (In Russ.)
38. Burshtar M. S., Shvemberger Yu. N. The deposits of the Maikop series of the Eastern Pre-Caucasus region as a possible reserve for the discovery of new oil and gas fields. *Proceedings VNIGNI*, 1970. Issue 100. pp. 98-110. (In Russ.)
39. Chepak G. N., Shaposhnikov V. M. Peculiarities of the oil content of the clayey strata of the Oligocene of the Eastern Ciscaucasia. *The geology of oil and gas*, 1983. No. 4. pp. 36-40. (In Russ.)
40. Chepak G. N., Skripkin A. P., Kovalev N. I. Syngenetic deposits of oil in the Paleogene sediments of the Eastern Trans-Caucasus. Ser. "Oil and gas", Coll. papers. Stavropol, 1998. No. 1. (In Russ.)
41. Cooper M. Structural style and hydrocarbon prospectivity in fold and thrust belts: a global review. Ries A. C., Butler R. W. & Graham R. H. *Deformation of the Continental Crust: The Legacy of Mike Coward*. Geological Society, London, 2007. Vol. 272. pp. 447-472.
42. May P. R. The Eastern Mediterranean basins: evolution and oil habitat. *AAPG Bulletin*, 1991. Vol. 75. pp. 1215-1232.
43. Pelet R. Evaluation quantitative des produits formés lors de l'évolution chimique de la matière organique. *Rev. d'Institut Français du Pétrole*, 1985. Vol. 40. No. 5. pp. 551-562.
44. Popkov V. I. Collision tectonics of the north-western Caucasus. *Natural Cataclysms and Global Problems of the Modern Civilization. Book of abstracts of the World Forum – International Congress*, September 19-21, Istanbul, Turkey SWB. London, 2011. pp. 78-79.
45. Roeder D. Fold-thrust belts at Peak Oil. In Goffey G. P., Craig J., Needham T., Scott R. *Hydrocarbons in contractal belts*. Geological Society, London, 2010. Vol. 348. pp. 7-31.
46. Sagy Yael. Tectono-sedimentary processes in the deep Levant basin. Dissertation. Tel-Aviv University, 2016. 136 p.
47. Xu Shilin, Lu Xiuxiang, Sun Zhonghua, Pi Xuejun, Liu Luofu, Li Qiming, Xie Huiwen. Kela-2: a major gas field in the Tarim Basin of west China. *Petroleum Geoscience*, 2004. Vol. 10. pp. 95-106.

УДК 550.34.01:539.3

DOI: [10.46698/VNC.2020.32.87.010](https://doi.org/10.46698/VNC.2020.32.87.010)

Оригинальная статья

Математическое моделирование нестационарных упругих волн напряжений (переходной процесс) при воздействии (вертикальное сосредоточенное в виде треугольного импульса) на поверхность полуплоскости (задача Лэмба)

В. К. Мусаев 

Московский государственный строительный университет, Россия, 129337, г. Москва,
Ярославское шоссе, д. 26;

Российский университет транспорта, Россия, 127994, Москва, ул. Образцова, д. 9, стр. 9;

Мингячевирский государственный университет, Республика Азербайджан,
AZ4500, Мингячевир, ул. Дилера Алиева, e-mail: musayev-vk@yandex. ru

Статья поступила: 15.10. 2020, после рецензирования: 06.11.2020, принята к публикации: 23.11.2020

Резюме: Актуальность работы. Рассматривается задача о численном моделировании продольных, поперечных и поверхностных волн на свободной поверхности упругой полуплоскости при воздействии вертикальной сосредоточенной нагрузки в виде треугольного импульса. Полученные результаты исследуемой задачи являются актуальными, так как позволяют выявить типы волн на поверхности упругой полуплоскости, которые применяются в сейсмологии и сейсмостойкости геообъектов. **Цель работы.** Для оценки несущей способности геообъектов нужна информация о напряженном состоянии. Поэтому получение информации об амплитудах и формах продольных, поперечных и релеевских волн в задаче Лэмба в виде контурных напряжений является актуальной фундаментальной научной задачей. **Методика.** Для решения нестационарной динамической задачи теории упругости с начальными и граничными условиями используется метод конечных элементов в перемещениях. С помощью метода конечных элементов в перемещениях, линейную задачу с начальными и граничными условиями привели к линейной задаче Коши. Предложен квазирегулярный подход к решению системы линейных обыкновенных дифференциальных уравнений второго порядка в перемещениях с начальными условиями и к аппроксимации исследуемой области. Методика основывается на схемах: точка, линия и плоскость. Исследуемая область разбивается по пространственным переменным на треугольные и прямоугольные конечные элементы первого порядка. По временной переменной исследуемая область разбивается на линейные конечные элементы с двумя узловыми точками. При разработке комплекса программ использовался алгоритмический язык Фортран-90 наблюдается динамический процесс в виде стоячих волн. **Результаты.** Приводится некоторая информация о численном моделировании упругих волн напряжений в упругой полуплоскости при сосредоточенном волновом воздействии в виде треугольного импульса (дельта-функции). Исследуемая расчетная область имеет 12008001 узловых точек. Решается система уравнений из 48032004 неизвестных. Показано изменение упругого контурного напряжения на свободной поверхности полуплоскости в разных точках. Амплитуда поверхностных волн Релея существенно больше амплитуд продольных, поперечных и других волн при сосредоточенном вертикальном воздействии в виде треугольного импульса на поверхности упругой полуплоскости. После поверхностных волн Релея наблюдается динамический процесс в виде стоячих волн.

Ключевые слова: нестационарный процесс, комплекс программ, волновая механика, вычислительная механика, треугольный импульс, задача Лэмба, волна Релея, стоячая волна.

Для цитирования: Мусаев В.К. Математическое моделирование нестационарных упругих волн напряжений (переходной процесс) при воздействии (вертикальное сосредоточенное в виде треугольного импульса) на поверхность полуплоскости (задача Лэмба). *Геология и геофизика Юга России*. 2020. 10 (4): 164 – 174. DOI: 10.46698/VNC.2020.32.87.010.

GEOTECHNOLOGY. GEOMECHANICS

DOI: [10.46698/VNC.2020.32.87.010](https://doi.org/10.46698/VNC.2020.32.87.010)

Original paper

Mathematical modeling of non-stationary elastic stress waves (transient process) under load (vertical concentrated as a triangular pulse) applied at surface of a half-plane (Lamb's problem)

V. K. Musayev 

Moscow State University of Civil Engineering, 26 Yaroslavl Highway,
Moscow 129337, Russian Federation;

Russian University of Transport, 9 Obraztsova Str., bldg. 9,
Moscow 127994, Russian Federation;

Mingachevir State University, Dilyara Alieva Str., Mingachevir AZ4500,
Republic of Azerbaijan, e-mail: musayev-vk@yandex. ru

Received: 15.10.2020, revised: 06.11.2020, accepted: 23.11.2020

Abstract: Relevance. The problem of numerical modeling of longitudinal, transverse and surface waves on the free surface of an elastic half-plane under the influence of a vertical concentrated load in the form of a triangular pulse is considered. The obtained results of the problem under study are relevant, since they allow us to identify the types of waves on the surface of an elastic half-plane that are used in seismology and seismic stability of geo objects. **The aim.** To assess the load-bearing capacity of geo objects, you need information about the stress state. Therefore, obtaining information about the amplitudes and shapes of longitudinal, transverse, and Rayleigh waves in the lamb problem in the form of contour stresses is an urgent fundamental scientific task. **Method.** To solve a non-stationary dynamic problem of elasticity theory with initial and boundary conditions, the finite element method in displacements is used. Using the finite element method in displacements, the linear problem with initial and boundary conditions was led to the linear Cauchy problem. A quasi-regular approach to solving a system of second-order linear ordinary differential equations in displacements with initial conditions and to approximating the domain under study is proposed. The method is based on the following diagrams: point, line, and plane. The study area is divided by spatial variables into triangular and rectangular finite elements of the first order. According to the time variable, the study area is divided into linear finite elements with two nodal points. The Fortran-90 algorithmic language was used in the development of the software package. **Results.** Some information is provided on numerical modeling of elastic stress waves in an elastic half-plane under concentrated wave action in the form of a triangular pulse (Delta-function). The estimated area under study has 12008001 nodal points. A system of equations consisting of 48032004 unknowns is solved. The change in the elastic contour stress on the free surface of the half-plane at different points is shown. The amplitude of surface Rayleigh waves is significantly greater than the amplitudes of longitudinal, transverse, and other waves when a

concentrated vertical action is performed in the form of a triangular pulse on the surface of an elastic half-plane. After surface Rayleigh waves, a dynamic process is observed in the form of standing waves.

Keywords: non-stationary process, software package, wave mechanics, computational mechanics, triangular momentum, lamb problem, Rayleigh wave, standing wave.

For citation: Musayev V. K. Mathematical modeling of non-stationary elastic stress waves (transient process) under load (vertical concentrated as a triangular pulse) applied at the surface of a half-plane (Lamb's problem). *Geologiya i Geofizika Yuga Rossii = Geology and Geophysics of Russian South*. (in Russ.). 2020. 10 (4): 164 – 174. DOI: 10.46698/VNC.2020.32.87.010.

Введение

Рассматривается задача о численном моделировании продольных, поперечных и поверхностных волн на свободной поверхности упругой полуплоскости при воздействии в виде дельта функции (задача Лэмба).

Волны напряжений различной природы, распространяясь в деформируемом теле, взаимодействуют друг с другом, что приводит к образованию новых областей возмущений.

После трехкратного или четырехкратного прохождения и отражения волн напряжений в теле процесс распространения возмущений становится установившимся, напряжения и деформации усредняются, тело находится в колебательном движении.

Постановка нестационарных динамических задач механики деформируемого твердого тела приведена в следующих работах [Акатьев и др., 2016, 2019; Джинчвелашвили и др., 2017; Дейвис, 1961; Зенкевич, 1975; Зенкевич и др., 1986; Кольский, 1955; Куранцов и др., 2017; Мусаев, 2017; Мухелишвили, 1966; Новацкий, 1975; Поттер, 1975; Саликов и др., 2016; Стародубцев и др., 2016, 2017а-в; Musayev, 1991, 2015, 2019].

Применение рассматриваемого численного метода, алгоритма и комплекса программ в задачах переходного процесса механики деформируемых тел приведена в работах [Акатьев и др., 2016, 2019; Джинчвелашвили и др., 2017; Куранцов и др., 2017; Мусаев, 2017; Саликов и др., 2016; Стародубцев и др., 2016, 2017а-в; Musayev, 1991, 2015, 2019].

Оценка достоверности и точности рассматриваемого численного метода, алгоритма и комплекса программ приведена в следующих работах [Акатьев и др., 2016; Джинчвелашвили и др., 2017; Куранцов и др., 2017; Мусаев, 2017; Саликов и др., 2016; Стародубцев и др., 2016, 2017а-в; Musayev, 1991, 2015].

Цель

Для решения задачи о моделировании нестационарных упругих волн в деформируемых областях сложной формы рассмотрим некоторое тело Γ в прямоугольной декартовой системе координат XOY , которому в начальный момент времени $t = 0$ сообщается механическое воздействие.

Предположим, что тело Γ изготовлено из однородного изотропного материала, подчиняющегося закону Гука при малых упругих деформациях.

Точные уравнения двумерной (плоское напряженное состояние) динамической теории упругости имеют вид

$$\begin{aligned} \frac{\partial \sigma_x}{\partial x} + \frac{\partial \tau_{xy}}{\partial y} &= \rho \frac{\partial^2 u_x}{\partial t^2}, \quad \frac{\partial \tau_{yx}}{\partial x} + \frac{\partial \sigma_y}{\partial y} = \rho \frac{\partial^2 u_y}{\partial t^2}, \quad (x, y) \in \Gamma, \\ \sigma_x &= \rho C_p^2 \varepsilon_x + \rho (C_p^2 - 2C_s^2) \varepsilon_y, \quad \sigma_y = \rho C_p^2 \varepsilon_y + \rho (C_p^2 - 2C_s^2) \varepsilon_x, \quad \tau_{xy} = \rho C_s^2 \gamma_{xy}, \\ \varepsilon_x &= \frac{\partial u_x}{\partial x}, \quad \varepsilon_y = \frac{\partial u_y}{\partial y}, \quad \gamma_{xy} = \frac{\partial u_x}{\partial y} + \frac{\partial u_y}{\partial x}, \quad (x, y) \in (\Gamma \cup S), \end{aligned} \quad (1)$$

где: σ_x , σ_y и τ_{xy} – компоненты тензора упругих напряжений; ε_x , ε_y и γ_{xy} – компоненты тензора упругих деформаций; u_x и u_y – составляющие вектора упругих перемещений вдоль осей OX и OY соответственно; ρ – плотность материала; $C_p = \sqrt{\frac{E}{\rho(1-\nu^2)}}$ – скорость продольной упругой волны; $C_s = \sqrt{\frac{E}{2\rho(1+\nu)}}$ – скорость поперечной упругой волны; ν – коэффициент Пуассона; E – модуль упругости; S ($S_1 \cup S_2$) – граничный контур тела Γ .

Систему (1) в области, занимаемой телом Γ , следует интегрировать при начальных и граничных условиях.

Для решения двумерной плоской динамической задачи теории упругости с начальными и граничными условиями (1) – используем метод конечных элементов в перемещениях.

Методика

Задача решается методом сквозного счета, без выделения разрывов. Чтобы выполнить динамический расчет методом конечных элементов, нужно иметь матрицу жесткости и матрицу инерции конечного элемента.

Принимая во внимание определение матриц и векторов для тела Γ , записываем приближенное уравнение движения в теории упругости

$$\bar{H}\ddot{\vec{\Phi}} + \bar{K}\vec{\Phi} = \vec{R}, \quad \vec{\Phi}|_{t=0} = \vec{\Phi}_0, \quad \dot{\vec{\Phi}}|_{t=0} = \dot{\vec{\Phi}}_0, \quad (2)$$

где: $\bar{H}$ – матрица инерции; $\bar{K}$ – матрица жесткости; $\vec{\Phi}$ – вектор узловых упругих перемещений; $\dot{\vec{\Phi}}$ – вектор узловых упругих скоростей; $\ddot{\vec{\Phi}}$ – вектор узловых упругих ускорений; $\vec{R}$ – вектор узловых упругих внешних сил.

Для интегрирования уравнения (2) конечноэлементным вариантом метода Галеркина приведем его к следующему виду

$$\bar{H} \frac{d}{dt} \dot{\vec{\Phi}} + \bar{K}\vec{\Phi} = \vec{R}, \quad \frac{d}{dt} \vec{\Phi} = \dot{\vec{\Phi}}. \quad (3)$$

Интегрируя по временной координате соотношение (3) с помощью конечноэлементного варианта метода Галеркина, получим двумерную явную двухслойную конечноэлементную линейную схему в перемещениях для внутренних и граничных узловых точек

$$\vec{\Phi}_{i+1} = \vec{\Phi}_i + \Delta t \bar{H}^{-1} (-\bar{K}\vec{\Phi}_i + \vec{R}_i), \quad \dot{\vec{\Phi}}_{i+1} = \dot{\vec{\Phi}}_i + \Delta t \ddot{\vec{\Phi}}_{i+1}, \quad (4)$$

где: Δt – шаг по временной координате.

Шаг по временной переменной Δt определяем из следующего соотношения

$$\Delta t = k \frac{\min \Delta l_i}{C_p} \quad (i = 1, 2, 3, \dots, r), \quad (5)$$

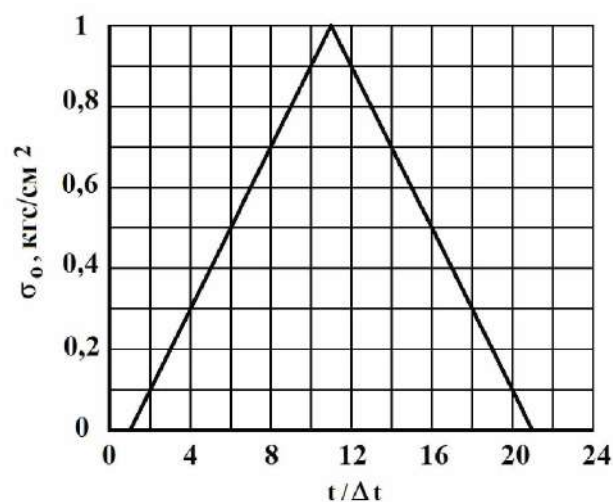


Рис. 2. Воздействие в виде дельта-функции. /
Fig. 2. Impact in the form of a delta function.

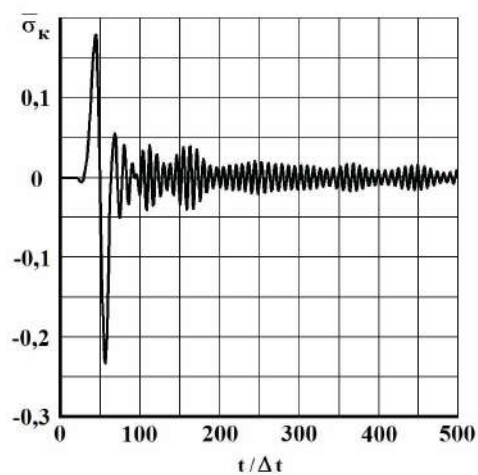


Рис. 3. Изменение упругого контурного напряжения $\bar{\sigma}_k$ во времени $t/\Delta t$ в точке A1. /
Fig. 3. Change in elastic contour stress $\bar{\sigma}_k$ in time $t/\Delta t$ at a point A1.

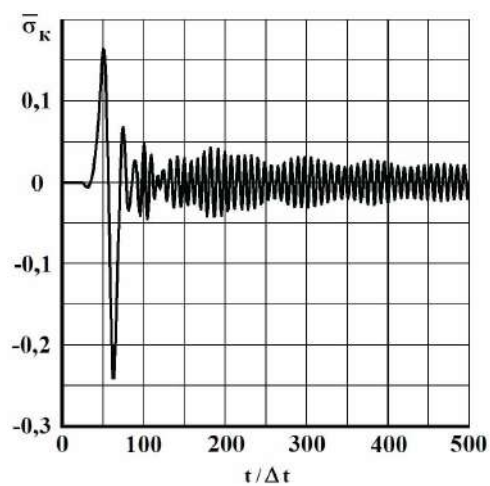


Рис. 4. Изменение упругого контурного напряжения $\bar{\sigma}_k$ во времени $t/\Delta t$ в точке A3. /
Fig. 4. Change in elastic contour stress $\bar{\sigma}_k$ in time $t/\Delta t$ at a point A3.

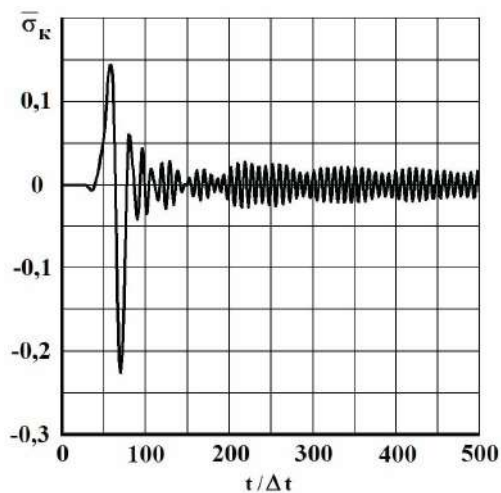


Рис. 5. Изменение упругого контурного напряжения $\bar{\sigma}_k$ во времени $t/\Delta t$ в точке A5. /
Fig. 5. Change in elastic contour stress $\bar{\sigma}_k$ in time $t/\Delta t$ at a point A5.

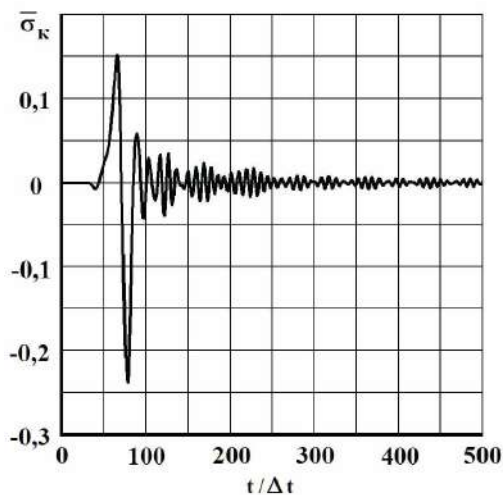


Рис. 6. Изменение упругого контурного напряжения $\bar{\sigma}_k$ во времени $t/\Delta t$ в точке A7. /
Fig. 6. Change in elastic contour stress $\bar{\sigma}_k$ in time $t/\Delta t$ at a point A7.

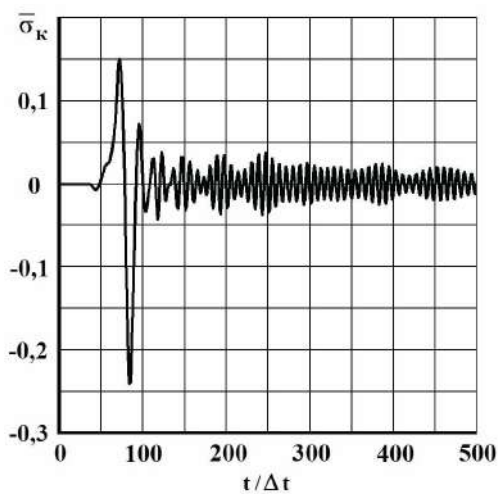


Рис. 7. Изменение упругого контурного напряжения $\bar{\sigma}_k$ во времени $t/\Delta t$ в точке A9. /
Fig. 7. Change in elastic contour stress $\bar{\sigma}_k$ in time $t/\Delta t$ at a point A9.

Расчеты проведены при следующих исходных данных: $H = \Delta x = \Delta y$; $\Delta t = 1,393 \times 10^{-6}$ с; $E = 3,15 \times 10^4$ МПа ($3,15 \times 10^5$ кгс/см²); $\nu = 0,2$; $\rho = 0,255 \times 10^4$ кг/м³ ($0,255 \times 10^{-5}$ кгс с²/см⁴); $C_p = 3587$ м/с; $C_s = 2269$ м/с.

Исследуемая расчетная область имеет 12008001 узловых точек. Решается система уравнений из 48032004 неизвестных.

На рисунках 3-7 показано изменение упругого контурного напряжения ($\bar{\sigma}_k (\bar{\sigma}_k = \sigma_k / |\sigma_0|)$) во времени n в точках A1, A3, A5, A7 и A9 (рис. 1), находящихся на свободной поверхности упругой полуплоскости (расстояние между точками: A1 и A2 равно H ; A2 и A3 равно H ; A3 и A4 равно H ; A4 и A5 равно H ; A5 и A6 равно H ; A6 и A7 равно H ; A7 и A8 равно H ; A8 и A9 равно H ; A9 и A10 равно H).

Заключение

1. На основе метода конечных элементов разработаны методика, алгоритм и комплекс программ для решения линейных двумерных плоских задач, которые позволяют решать сложные задачи при нестационарных волновых воздействиях на сложные объекты. Основные соотношения метода конечных элементов получены с помощью принципа возможных перемещений. Матрица упругости выражена через скорость продольных волн, скорость поперечных волн и плотность.

2. Линейная динамическая задача с начальными и граничными условиями в виде дифференциальных уравнений в частных производных, для решения задач при волновых воздействиях, с помощью метода конечных элементов в перемещениях приведена к системе линейных обыкновенных дифференциальных уравнений с начальными условиями, которая решается по явной двухслойной схеме.

3. Решена задача о математическом моделировании нестационарных упругих волн напряжений при сосредоточенном вертикальном воздействии в виде дельта-функции на поверхность полуплоскости. Решается система уравнений из 48032004 неизвестных. Растягивающее упругое контурное напряжение $\bar{\sigma}_k$ имеет следующее максимальное значение $\bar{\sigma}_k = 0,18$. Сжимающее упругое контурное напряжение $\bar{\sigma}_k$ имеет следующее максимальное значение $\bar{\sigma}_k = -0,24$.

4. Амплитуда поверхностных волн Релея существенно больше амплитуд продольных, поперечных и других волн при сосредоточенном вертикальном воздействии в виде треугольного импульса на поверхность упругой полуплоскости.

5. На поверхности упругой полуплоскости распространяются волны с разной скоростью, поэтому на определенных расстояниях они могут быть явно выделены.

6. После прохождения поверхностных волн Релея наблюдается динамический процесс в виде стоячих волн.

Литература

1. Акатьев С. В., Суцев Т. С., Куранцов В. В., Мусаев А. В., Дикова Е. В. Оценка точности моделирования плоских волн (прямоугольный импульс) в упругой полуплоскости с помощью численного метода, алгоритма и комплекса программ Мусаева В. К. // Техносферная безопасность, надежность, качество, энерго и ресурсосбережение: ТЗ8. Материалы Международной научно-практической конференции. Выпуск XVIII. В 2 т. Том 2. – Ростов-на-Дону: Донской государственный технический университет, 2016. – С. 22-31.

2. Акатьев С. В., Куранцов В. В., Куранцов В. А., Мусаев А. В., Дикова Е. В. Применение численного метода и комплекса программ Мусаева В. К. для моделирования несущей способности технических систем с помощью волновой теории взрывной безопасности. //

Высшая школа. Новые технологии науки, техники, педагогики: материалы Всероссийской научно-практической конференции «Наука – Общество – Технологии – 2019». – М.: Московский политех, 2019. – С. 161-167.

3. Джинчвелашвили Г. А., Попадейкин В. В., Аксенов В. А., Блинные В. В., Доронин Ф. Л. О физической достоверности и математической точности моделирования нестационарных волн напряжений в деформируемых телах с помощью численного метода, алгоритма и комплекса программ Мусаева В. К. // Техносферная безопасность, надежность, качество, энерго и ресурсосбережение: ТЗ8. Материалы Международной научно-практической конференции. Выпуск XIX. В 2 т. Том 2. – Ростов-на-Дону: Донской государственный технический университет, 2017. – С. 55-63.

4. Дэйвис Р. Волны напряжений в твердых телах. – М.: Иностранная литература, 1961. – 104 с.

5. Зенкевич О. Метод конечных элементов в технике. – М.: Мир, 1975. – 543 с.

6. Зенкевич О., Морган К. Конечные элементы и аппроксимация. – М.: Мир, 1986. – 320 с.

7. Кольский Г. Волны напряжений в твердых телах. – М.: Иностранная литература, 1955. – 192 с.

8. Куранцов В. А., Стародубцев В. В., Мусаев А. В., Самойлов С. Н., Кузнецов М. Е. Моделирование импульса (первая ветвь: восходящая часть – четверть круга, нисходящая часть – линейная; вторая ветвь: треугольник) в упругой полуплоскости с помощью численного метода Мусаева В. К. // Проблемы безопасности российского общества. – 2017. – № 2. – С. 51-55.

9. Мусаев В. К. Применение волновой теории сейсмического воздействия для моделирования упругих напряжений в Курпсайской плотине с грунтовым основанием при незаполненном водохранилище. // Геология и геофизика Юга России. – 2017. – № 2. – С. 98-105.

10. Мухелишвили Н. И. Некоторые основные задачи математической теории упругости. – М.: Наука, 1966. – 708 с.

11. Новацкий В. Теория упругости. – М.: Мир, 1975. – 872 с.

12. Поттер Д. Вычислительные методы в физике. – М.: Мир, 1975. – 392 с.

13. Саликов Л. М., Мусаев А. В., Идельсон Е. В., Самойлов С. Н., Блинные В. В. Оценка физической достоверности моделирования плоских нестационарных упругих волн напряжений в виде импульсного воздействия (функция Хевисайда) в полуплоскости с помощью численного метода, алгоритма и комплекса программ Мусаева В. К. // Проблемы управления безопасностью сложных систем. Материалы XXIV Международной конференции. – М.: РГТУ, 2016. – С. 356-359.

14. Стародубцев В. В., Мусаев А. В., Куранцов В. А., Мусаева С. В., Кулагина Н. В. Оценка точности и достоверности моделирования плоских нестационарных упругих волн напряжений (треугольный импульс) в полуплоскости с помощью численного метода, алгоритма и комплекса программ Мусаева В. К. // Проблемы управления безопасностью сложных систем. Материалы XXIV Международной конференции. – М.: РГТУ, 2016. – С. 352-355.

15. Стародубцев В. В., Акатьев С. В., Мусаев А. В., Шиянов С. М., Куранцов О. В. Моделирование с помощью численного метода Мусаева В. К. нестационарных упругих волн в виде импульсного воздействия (восходящая часть – четверть круга, средняя – горизонтальная, нисходящая часть – линейная) в сплошной деформируемой среде. // Проблемы безопасности российского общества. – 2017а. – № 1. – С. 63-68.

16. Стародубцев В. В., Мусаев А. В., Дикова Е. В., Крылов А. И. Моделирование достоверности и точности импульсного воздействия в упругой полуплоскости с помощью численного метода, алгоритма и комплекса программ Мусаева В. К. // Информационно-телекоммуникационные технологии и математическое моделирование высокотехнологичных систем. Материалы Всероссийской конференции с международным участием. – М.: РУДН, 2017а. – С. 339-341.

17. Стародубцев В. В., Акатьев С. В., Дикова Е. В., Мусаев А. В., Крылов А. И. Моделирование импульсного воздействия (восходящая часть – четверть круга, нисходящая часть – четверть круга) в полуплоскости с помощью численного метода, алгоритма и комплекса программ Мусаева В. К. // Новые технологии науки, техники, педагогики высшей школы: материалы Международной научно-практической конференции «Наука – Общество – Технологии – 2017». – М.: Московский политех, 2017б. – С. 82-87.

18. Musayev V. K. Testing of stressed state in the structure-base system under non-stationary dynamic effects. // Proceedings of the second International conference on recent advances in geotechnical earthquake engineering and soil dynamics. – Sent-Louis: University of Missouri-Rolla. – 1991. – Vol. 3. – pp. 87-97.

19. Musayev V. K. Estimation of accuracy of the results of numerical simulation of unsteady wave of the stress in deformable objects of complex shape. // International Journal for Computational Civil and Structural Engineering. – 2015. – Vol. 11. Is. 1. – pp. 135-146.

20. Musayev V. K. Mathematical modeling of seismic nonstationary elastic waves stresses in Kurpsai dam with a base (half-plane). // International Journal for Computational Civil and Structural Engineering. – 2016. – Vol. 12. Is. 3. – pp. 73-83.

References

1. Akat'ev S. V., Sushchev T. S., Kurantsov V. V., Musaev A. V., Dikova E. V. Estimation of the accuracy of modeling plane waves (rectangular impulse) in an elastic half-plane using a numerical method, algorithm and software package of Musaev V. K. In: Proceedings of the International Scientific and Practical Conference. Issue XVIII. In 2 volumes. Volume 2. Rostov-on-Don. Don State Technical University, 2016. pp. 22-31. (In Russ.)

2. Akat'ev S. V., Kurantsov V. V., Kurantsov V. A., Musaev A. V., Dikova E. V. Application of the numerical method and software package of Musaev V. K. for modeling the bearing capacity of technical systems using the wave theory of explosive safety. In: Proceedings of the All-Russian scientific and practical conference "Science – Society – Technologies – 2019". Moscow. Moscow Polytech, 2019. pp. 161-167. (In Russ.)

3. Dzhinchvelashvili G. A., Popadeikin V. V., Aksenov V. A., Blinnikov V. V., Doronin F. L. On the physical reliability and mathematical accuracy of modeling non-stationary stress waves in deformable bodies using the numerical method, algorithm and software package of Musaev V. K. In: Proceedings of the International Scientific and Practical Conference. Issue XIX. In 2 volumes. Volume 2. Rostov-on-Don. Don State Technical University, 2017. pp. 55-63. (In Russ.)

4. Davis R. Stress waves in solids. Moscow. Foreign Literature, 1961. 104 p. (In Russ.)

5. Zenkevich O. The finite element method in technology. Moscow. Mir, 1975. 543 p. (In Russ.)

6. Zenkevich O., Morgan K. Finite elements and approximation. Moscow. Mir, 1986. 320 p. (In Russ.)

7. Kol'skii G. Stress waves in solids. Moscow. Foreign literature, 1955. 192 p. (In Russ.)

8. Kurantsov V. A., Starodubtsev V. V., Musaev A. V., Samoilov S. N., Kuznetsov M. E. Modeling an impulse (the first branch: the ascending part is a quarter of a circle, the descending part is linear; the second branch: a triangle) in the elastic half-plane using the numerical method of Musaev V. K. Problems of the security of Russian society. 2017. No. 2. pp. 51-55. (In Russ.)

9. Musaev V. K. Application of the wave theory of seismic impact for modeling elastic stresses in the Kurpsay dam with a soil base for an unfilled reservoir. Geology and Geophysics of Russian South. 2017. No. 2. pp. 98-105. (In Russ.)

10. Muskhelishvili N. I. Some basic problems of the mathematical theory of elasticity. Moscow. Nauka, 1966. 708 p. (In Russ.)

11. Novatskii V. Theory of elasticity. Moscow. Mir, 1975. 872 p. (In Russ.)

12. Potter D. Computational methods in physics. Moscow. Mir, 1975. 392 p. (In Russ.)

13. Salikov L. M., Musaev A. V., Idel'son E. V., Samoilov S. N., Blinnikov V. V. Assessment of the physical reliability of modeling plane non-stationary elastic stress waves in the form of an impulse action (Heaviside function) in a half-plane using a numerical method, an algorithm and a complex of programs by Musaev V. K. In: Proceedings of the XXIV International Conference. Problems of security management of complex systems. Moscow. RGGU, 2016. pp. 356-359. (In Russ.)
14. Starodubtsev V. V., Musaev A. V., Kurantsov V. A., Musaeva S. V., Kulagina N. V. Estimation of the accuracy and reliability of modeling plane non-stationary elastic stress waves (triangular pulse) in a half-plane using a numerical method, an algorithm and a complex of programs by Musaev V. K. In: Proceedings of the XXIV International Conference. Problems of security management of complex systems. Moscow. RGGU, 2016. pp. 352-355. (In Russ.)
15. Starodubtsev V. V., Akat'ev S. V., Musaev A. V., Shiyanov S. M., Kurantsov O. V. Modeling using the numerical method of Musaev V. K. non-stationary elastic waves in the form of impulse action (the ascending part is a quarter of a circle, the middle part is horizontal, the descending part is linear) in a continuous deformable medium. Problems of the security of Russian society. 2017a. No. 1. pp. 63-68. (In Russ.)
16. Starodubtsev V. V., Musaev A. V., Dikova E. V., Krylov A. I. Modeling the reliability and accuracy of impulse action in an elastic half-plane using a numerical method, algorithm and software package of Musaev V. K. In: Proceedings of the All-Russian conference with international participation. Information and telecommunication technologies and mathematical modeling of high-tech systems. Moscow. RUDN, 2017a. pp. 339-341. (In Russ.)
17. Starodubtsev V. V., Akat'ev S. V., Dikova E. V., Musaev A. V., Krylov A. I. Modeling an impulse impact (ascending part – a quarter of a circle, descending part – a quarter of a circle) in a half-plane using a numerical method, an algorithm and a complex of programs of Musaev V. K. In: Proceedings of the International scientific and practical conference "Science – Society – Technologies – 2017". New technologies of science, technology, pedagogy of higher education. Moscow. Moscow Polytech, 2017b. pp. 82-87. (In Russ.)
18. Musayev V. K. Testing of stressed state in the structure-base system under non-stationary dynamic effects. Proceedings of the second International conference on recent advances in geotechnical earthquake engineering and soil dynamics. Sent-Louis: University of Missouri-Rolla, 1991. Vol. 3. pp. 87-97.
19. Musayev V. K. Estimation of accuracy of the results of numerical simulation of unsteady wave of the stress in deformable objects of complex shape. International Journal for Computational Civil and Structural Engineering, 2015. Vol. 11. Is. 1. pp. 135-146.
20. Musayev V. K. Mathematical modeling of seismic nonstationary elastic waves stresses in Kurpsai dam with a base (half-plane). International Journal for Computational Civil and Structural Engineering, 2016. Vol. 12. Is. 3. pp. 73-83.

ПАМЯТЬ

**СЕРГО АКАКИЕВИЧ ГОГМАЧАДЗЕ
1948-2020**

Дирекция и коллектив Геофизического института Владикавказского научного центра Российской академии наук (ГФИ ВНИЦ РАН) с глубоким прискорбием объявляет о преждевременной кончине известного советского и грузинского ученого Серго Акакиевича Гогмачадзе, члена Грузинской академии технических наук, Национальной академии, Национальной академии «Фазис», академического доктора геологических наук, профессора Грузино-Американского университета.

Серго Акакиевич Гогмачадзе родился 25 апреля 1948 г. в селе Мэриа Озургетского района, в Гурии. В 1965 году там же окончил среднюю школу. В 1965-1970 гг. учился в Грузинском политехническом институте. В 1972 г. окончил географический и геологический факультет Тбилисского государственного университета по специальности геоморфология. С 1974 г. начал работать в Институте строительной механики и сейсмостойкости АН ГССР (ИСМиС) на должности младшего научного сотрудника. В 1977–1980 гг. прошел аспирантуру ИСМиС. В 1993 году защитил диссертацию на тему «Влияние инженерно-геологических, геоморфологических и гидрогеологических условий на интенсивность землетрясений» и в 1997 г. был переведен по конкурсу на должность старшего научного сотрудника.

В 2005-2010 гг. академический доктор Серго Гогмачадзе успешно возглавлял лабораторию инженерной сейсмологии и геотехники, которой до него в 1999-2005 гг. руководил В. Б. Заалишвили, а еще раньше – их общий наставник директор ИСМиС АН ГССР, член-корр. АН Грузии Шио Германович Напетваридзе.

С 2012 года Серго Гогмачадзе работал старшим научным сотрудником группы сейсмических опасностей и риска катастроф сектора сейсмологии Института геофизики им. М. Нодия Тбилисского государственного университета им. И. Джавахишвили. Его научные интересы были обширными и включали инженерную сейсмологию, геофизику, геологию, инженерную геологию, гидрологию, механику грунтов, основания и фундаменты, гляциологию и геоэкологию.

С. А. Гогмачадзе внес большой вклад в современную идентификацию грунтов, распространенных в Грузии, в соответствии с европейскими и американскими стандартами, особенно с учетом их сейсмических свойств. Он занимался изучением влияния инженерно-геологических, гидрологических и геоморфологических условий на оценку интенсивности землетрясений с помощью методов математического и физического моделирования и путем анализа результатов натурных наблюдений и специальных экспериментов.

С. А. Гогмачадзе и В. Б. Заалишвили в 1984 году ввели понятие, т. н. коэффициента «рельефности», который характеризует увеличение интенсивности землетрясений на основе выявленной взаимосвязи между наклоном рельефа и высотой расположения участка до одного-двух баллов.

В связи с кончиной в 1997 г. руководителя работы (Ш. Г. Напетваридзе), пришлось так, что мне пришлось принять активное участие в завершении, кандидатской работы Серго Гогмачадзе. Фактически – в качестве научного руководителя. При этом я использовал все свои возможности, чтобы довести работу до конца. Учитывая наше полнейшее взаимопонимание и уровень подготовки Серго Гогмачадзе, больших проблем практически не было. Правда, иногда наши жаркие дебаты «сокрушали» научное пространство института. С. А. Гогмачадзе кандидатскую работу свою защитил на диссертационном совете в Институте геологии АН Грузии вполне успешно. Далее он работал над решением ряда фундаментальных вопросов инженерной сейсмологии, таких как сейсмическое микрорайонирование, сейсмостойкость высоких и уникальных зданий, динамика фундаментов зданий и макро-сейсмический анализ последствий сильных землетрясений.

С. А. Гогмачадзе после ухода из ИСМиС занимался активной практической деятельностью, в частности, инженерно-геологическими и геофизическими исследованиями в учреждении ООО «Килук» – сначала, как директор, а затем как технический директор. Долгие годы он являлся экспертом по специальным зданиям (категория V) Министерства экономики и устойчивого развития Грузии.

Серго Гогмачадзе является автором / соавтором 9 монографий, 103 научных работ, некоторые из которых опубликованы в различных международных журналах, имеющих высокий импакт-фактор.

В 2013-2018 гг., в период работы профессором Грузино-Американского университета, им были опубликованы одна монография и 12 работ. Он участвовал в двенадцати международных, национальных и межведомственных грантах в качестве руководителя, лидера группы или исполнителя. Выступал с докладами на многих международных конгрессах и конференциях.

Необходимо отметить, что С. А. Гогмачадзе принимал активное участие в создании действующих Грузинских строительных норм и правил ПН. 01.01-09 «Сейсмостойкое строительство» и «Программы профессионального обучения и поддержки модального обучения» в рамках DACUM.

Далее, остановимся на других аспектах личности Серго Гогмачадзе. Так уж получилось, что нас с Серго вместе свела судьба еще в 70 годах прошлого столетия в стенах ИСМиС в отделе инженерной сейсмологии и теории сейсмостойкости, руководимым членом-корреспондентом АН Грузии Напетваридзе Ш.Г. И мы проработали вместе до 2005 года. За это время я уезжал на учебу в докторантуру ИФЗ им. О. Ю. Шмидта РАН, стал доктором наук (МГУ, 1996 г.), начал активно работать в различных организациях России. При этом по предложению и настоятельной рекомендации директора ИФЗ РАН академика РАН Страхова В. Н. и члена-корреспондента РАН Николаева А. В. я продолжил работу в Грузии. Думаю, наши старшие коллеги видели, несомненно, дальше и глубже нас многие важные вещи.

Мы вместе ездили на макросейсмическое обследование сильных землетрясений: Дманисского (Грузия, 1978), Гавазского (Грузия, 1981), Спитакского (Армения, 1988), Рачинского (Грузия, 1991), Гоубанского (Грузия, 2000), Тбилисского (Грузия, 2002) и др. Мы принимали участие в обследовании целого ряда исторических землетрясений: Ахалкалакского (Грузия, 1899), Карталинского или Горийского (Грузия, 1920) и т. д.

Иногда мы ездили на научные конференции, встречались с коллегами и друзьями, в том числе, из Азербайджана, Армении, Молдовы, России, Украины, республик Центральной Азии – со всего необъятного СССР.

Мы вместе выполняли работы по сейсмическому микрорайонированию территорий большей части городов Грузии (Тбилиси, Кутаиси, Сухуми, Гагра, Батуми, Боржоми, Гали, Ткварчели и др.).

Почти сорок лет мы были рядом, и за все это время между нами не было каких либо недоговорок, и были только понимание и, как потом стало необратимо ясным – дружба. Действительно, хотя мы часто спорили, но оба активно работали и, как выяснилось позже, активно дружили. И все это – в условиях насыщенной сложнейшими интригами, жесткой конкуренции, в совсем не безоблачной и непростой советской академической жизни.

Потом мы стали встречаться намного реже, живя и работая в различных государствах. С таким же пониманием и дружбой. Женились, разводились, любили, хоронили друзей, женили и выдавали замуж детей. Серго женил внука и даже дождался правнука. Семья его любила. И он глубоко почитал семью и свою супругу Нази. Дети, уже взрослые девушки Тамта и Эка относились к нему с большой любовью и уважением.

Должен отметить его глубокую и, несомненно, искреннюю Веру в Бога. Он был, как я понимаю, хорошим христианином. Уже в старшем возрасте регулярно посещал богослужения в церкви, особенно в воскресные дни.

Серго очень любил Грузию и гордился принадлежностью к грузинской нации. Хорошо пел, танцевал, любил витиеватые тосты. Долгие годы входил в общество, для членов которого было обязательным периодическое ношение чохи (черкески, на русском). При этом никто никогда не слышал и даже не ощущал в Серго признаков малейшего национализма. Нет! Он относился с огромным почтением и теплотой к представителям различных наций и радовался, когда ощущал в ответ на свою открытость, исходящую от них такую же искренность и дружбу. Хорошо помню, с каким уважением и теплотой относился к моей второй супруге Ольге, осетинке по национальности. Ненавязчиво проявлял хорошее знание осетинских традиций и уважение к ним. В нем не было мелкости, он был настоящим мужчиной. И никогда



не опускался до недостойного, даже когда ему было, что терять. Хотя был горячего нраву, держать в руках себя старался и вполне мог, особенно возмужав.

Серго Гогмачадзе прожил, как оказалось, совсем непростую жизнь. Но не помню его в состоянии уныния, модной ныне депрессии. Даже в сложнейших условиях в нем всегда искрилась надежда, а на лице всегда играла доброжелательная улыбка. Это всегда окрыляет окружающих.

После назначения меня директором Института в г. Владикавказе, одной из важных проблем, стала необходимость создания научной библиотеки. Я обратился с просьбой о поддержке к родному ИСМиС, и неожиданно получил серьезную поддержку таких уважаемых мною людей, как доктор А. В. Одишария. Мне подготовили большое число специальной литературы. Кроме этого мои близкие собрали для меня все домашние книги по физике, математике, геофизике и геологии. В сентябре 2004 г. я на автомашине нашего учреждения выехал в Южную Осетию. Там в Цхинвали меня на своей личной автомашине в окружении зевак поджидал Серго Гогмачадзе с более чем 1000 книгами и своей искренней улыбкой. Хватило нескольких минут для перекидывания связок и нашего, более чем, горячего прощания. Нужно отметить, что на пропускных пунктах грузинскими и осетинскими военными проявилась, думаю, большая гражданская ответственность. И с другой стороны, высокую гражданскую ответственность, мужество и дружбу проявил и сам Серго, заехав в тогдашних сложных условиях, на территорию непризнанной республики. Привезенные книги стали основой достаточно хорошей научной библиотеки.

Позже, встречаясь с Серго в Тбилиси, мы часто обсуждали эволюцию инженерной сейсмологии, как фундаментальной науки. Нам обоим было совсем не все равно ее современное состояние. Особенно в Грузии и России, да и вообще, на Кавказе. Мы, в частности, переживали за деградацию некоторых идей и направлений. Хочу

отметить, что Серго умел внимательно слушать и слышать, особенно в беседах на профессиональные темы.

Как то так получилось, что Серго Гогмачадзе, очевидно, под впечатлением от наших душевных бесед, решил и в 2014 г. написал книгу. Книга так и называется: «В.Б. Заалишвили и российско-грузинская школа инженерной сейсмологии». Она получилась неожиданно объемной, в целых 500 страниц. Это произошло неожиданно, и было, думаю, навеяно свыше. Мне, моим ученикам и коллегам пришлось напрячься, готовя для Серго и его книги необходимые, на его взгляд, материалы. Самое курьезное, что иногда я даже забывал, что пишет собственно книгу Серго, а не я ... и негоже мне направлять его.

Книга включает идентичные по содержанию тексты на русском, английском и грузинском языках. Мой учитель, член-корр. РАН Алексей Всеволодович Николаев, ныне покойный, написал по просьбе Серго предисловие к книге, а также воспоминания о нашей общей работе.

В последние годы в содружестве с Серго Гогмачадзе мы написали целый ряд совместных научных работ, которые были успешно опубликованы. Отдельные работы были написаны в результате переосмысления наших более ранних практических исследований.

Мы с Серго Гогмачадзе ставили много научных и организационных задач на будущее. Надеялись на успешное решение целого ряда новых фундаментальных научных задач. К сожалению, многое из того, что намечали, осталось невыполненным. Все завершилось, как всегда это бывает, неожиданно и болезненно жестко. Жизнь – суровая штука

Сейчас, оглядываясь назад, я понимаю, что в вечность ушел еще один близкий мне человек и унес с собой частицу моего сердца.

В завершение я и мои коллеги, многие из которых знали Серго по совместному международному гранту и общей научной работе, выражаем наше искреннее соболезнование родным и близким известного грузинского ученого, педагога, коллеги, друга и просто Человека – Серго Акакиевича Гогмачадзе. Память о нем, пока мы есть, останется в наших сердцах.

Главный редактор журнала «Геология
и геофизика Юга России»
д. ф. – м. н., профессор

В.Б. Заалишвили

ИНФОРМАЦИЯ ДЛЯ АВТОРОВ

В журнале «Геология и геофизика Юга России» публикуются оригинальные статьи теоретического и методического характера по вопросам геологии, геофизики и геохимии, результаты изучения состава и строения коры и мантии Земли, процессов формирования и общих закономерностей размещения полезных ископаемых, а также результаты разработки и применения геолого-геофизических методов их выявления. Тематика журнала соответствует следующим областям знаний по действующей номенклатуре ВАК: 25.00.03 – Геотектоника и геодинамика; 25.00.10 – Геофизика, геофизические методы поисков полезных ископаемых; 25.00.11 – Геология, поиски и разведка твердых полезных ископаемых, минерагения; 25.00.23 – Физическая география и биогеография, география почв и геохимия ландшафтов; 25.00.35 – Геоинформатика; 25.00.36 – Геоэкология, а также смежным научным направлениям.

Для работ регионального характера предпочтение отдается статьям, раскрывающим различные вопросы геологического строения Юга России и прилегающих территорий.

В соответствии с градацией наук, принятой в международных системах цитирования Scopus и Web of Science статьи для публикации в журнале «Геология и геофизика Юга России» принимаются по следующим отраслям и группам наук:

1. Earth and Planetary Sciences (**науки о Земле и планетарные науки**);
2. Environmental Science (**наука об окружающей среде**).

В журнале «Геология и геофизика Юга России» печатаются:

- статьи с изложением новых научных результатов, объемом не более 10 машинописных страниц, включая иллюстрации и таблицы;
- краткие сообщения, содержащие информацию о важных результатах предварительных исследований, объемом 3-5 страниц (эти материалы впоследствии могут использоваться в тексте полной статьи);
- обзоры печатных работ по актуальным геолого-геофизическим и экологическим проблемам Юга России и прилегающих территорий, объемом 20-25 страниц по заказу редакции.

Все работы должны соответствовать тематике журнала. Предоставленные рукописи проходят этапы предварительного и итогового рецензирования, и в случае необходимости, направляются авторам на исправление и доработку. Рукописи в журнале публикуются на русском либо английском языках, аннотации на русском и английском языках. Журнал публикует исключительно оригинальные статьи. Автор несет полную ответственность за соблюдение этого требования. Рукописи, не принятые к опубликованию, авторам не возвращаются. Редакция также не возвращает присылаемые материалы. Редакция оставляет за собой право производить сокращение и редакторскую правку текста статьи. Исправления в тексте и иллюстрациях авторы могут вносить только на стадии подготовки статьи к набору. Несоблюдение правил оформления рукописи приведет к отклонению статьи. Публикация бесплатна для авторов статей, написанных по заказу редакции, и для аспирантов. Перепечатка допускается только с разрешения редакции и с обязательной ссылкой на журнал «Геология и геофизика Юга России».

Инструкция для авторов

Прием материалов к рассмотрению осуществляется посредством электронного сервиса <http://www.geosouth.ru> или по почте на адрес Издательства: 362002, Россия, г. Владикавказ, ул. Маркова 93а, редакция журнала «Геология и геофизика Юга России».

В редакцию необходимо предоставить следующие материалы:

- статья (структуру и правила оформления см. ниже);
- на отдельной странице: сведения об авторах, содержащие фамилию, имя, отчество, ученую степень, звание, название организации, служебный и домашний адрес и телефоны, e-mail и указание, с кем из авторов предпочтительнее вести переписку;
- направление от организации, если предоставляемые материалы являются результатом работы, выполненной в этой организации; в направлении следует указать название рубрики журнала;
- экспертное заключение или другой документ, разрешающий опубликование в открытой печати, утвержденные руководителем организации и заверенные гербовой печатью (представляют только авторы из России).

Если материалы подаются посредством электронного сервиса, бумажные экземпляры рукописи в редакцию предоставлять не требуется. При онлайн регистрации необходимо руководствоваться пошаговыми инструкциями по загрузке файлов. При отправке материалов почтой необходимо приложить два бумажных экземпляра статьи, подписанных всеми авторами. Подготовленный в соответствии с общими техническими требованиями текст печатается на одной стороне листа формата А4. Аннотация с приведенным в начале названием, авторами, их аффилиацией печатается на отдельном листе. Подписи к рисункам также предоставляются отдельно. Каждая таблица и рисунок должны быть напечатаны на отдельном листе. Внизу страницы с иллюстрацией необходимо указать номер рисунка. Также необходимо приложить электронный вариант на любом портативном накопителе или по согласованию с редакцией направить соответствующие материалы по электронной почте.

Правила оформления статьи

На первой странице должны быть указаны: УДК; название статьи на русском языке (строчными буквами с капитализацией начальной буквы только первого слова в предложении и имен собственных, без кавычек, переносы не допускаются, точка в конце не ставится, подчеркивание не используется), кегль 20 полужирный, выравнивание по центру; инициалы и фамилии авторов, ученая степень и звание (кегль 14 полужирный курсив, выравнивание по центру), название учреждения, почтовый адрес, город, страна представляющих рукопись для опубликования. Указать e-mail для переписки ответственного автора.

Аннотация должна быть объемом 250-300 слов. В ней не рекомендуется использовать формулы и ссылки на литературу. Если рукопись подается на русском языке, то аннотация должна быть продублирована на английском с указанием названия статьи, фамилий и инициалов авторов на этих языках. Если рукопись подается на английском языке, необходимо привести также аннотацию на русском. Аннотация печатается шрифтом Times New Roman (12 кегль). В конце аннотации обязательно указываются ключевые слова (5-8), которые отражают тематику статьи.

Текст статьи набирается шрифтом Times New Roman размером 14 пт через одинарный интервал, выравнивание по формату. Подзаголовок – шрифт курсивный, выравнивание по левому краю. При написании статьи используются общепринятые термины, единицы измерения и условные обозначения, единообразные по всей статье. Расшифровка всех используемых авторами обозначений дается при первом употреблении в тексте. Буквы латинского алфавита набираются курсивом, буквы греческого алфавита – прямым шрифтом. Математические символы $\lim$, $\lg$, $\ln$, $\arg$, const , $\sin$, $\cos$, $\min$, $\max$ и т. п. набираются прямым шрифтом. Символ не должен сливаться с надсимвольным элементом в химических элементах (H_2O) и единицах измерений (МВт/см^2) – прямым

(обычным) шрифтом. Не следует смешивать одинаковые по написанию буквы латинского, греческого и русского алфавитов, использовать собственные макросы. Буквы I и J, v и u, e и l, h и n, q и g, V и U, O (буква) и 0 (нуль) должны различаться по начертанию. Между цифровым значением величины и ее размерностью следует ставить знак неразрывного пробела. Переносы в словах либо не употреблять. Не использовать в тексте для форматирования знаки пробела. Формулы создаются с помощью встроенного редактора формул Microsoft Equation с нумерацией в круглых скобках – (2), выравниваются по правому краю, расшифровка всех обозначений (букв) в формулах дается в порядке упоминания в формуле. Во избежание недоразумений и ошибок редакция рекомендует авторам использовать в формулах буквы латинского, греческого и других (не русских) алфавитов; при наборе формул необходимо соблюдать размеры по умолчанию. Большие формулы необходимо разбивать на отдельные фрагменты. Фрагменты формул по возможности должны быть независимы (при использовании формульного редактора каждая строка – отдельный объект). Нумерацию и по возможности знаки препинания следует ставить отдельно от формул обычным текстом. Таблицы, рисунки, фотографии размещаются внутри текста и имеют сквозную нумерацию по статье (не по разделам!) и собственные заголовки. Названия всех рисунков, фотографий и таблиц приводятся на русском языке 11 кеглем, курсивом. Нумерация обозначений на рисунках дается по порядку номеров по часовой стрелке или сверху вниз. Рисунки необходимо по возможности выполнять в векторном формате виде, желательно в программе Corel Draw или аналогах по следующим правилам: ширина рисунка не более 16,5 см; толщина линий: основных – 1 пт, вспомогательных – 0,5 пт; для обозначений в поле рисунка использовать шрифт Times New Roman размером – 9 пт. Векторные рисунки записываются в отдельные файлы документов. Фотоснимки должны быть контрастными и выполненными на матовой бумаге. Отсканированные фотографии записываются в файлы в формате TIFF, JPEG. Сканировать изображение следует с разрешением 300 dpi для контрастных черно-белых рисунков и 600 dpi – для полутоновых. Цветные иллюстрации допускаются по согласованию с редакцией. Обозначения, термины, иллюстративный материал, список литературы должны соответствовать действующим ГОСТам.

Перечень литературных источников приводится общим списком в конце статьи (Harvard Style). Список составляется по алфавиту, сначала следуют источники на русском, затем – на английском. Литература должна быть оформлена согласно ГОСТ Р 7.0.5-2008. Отсылки на литературу в тексте приводятся в квадратных скобках в строку с текстом документа. Если ссылку приводят на документ, созданный одним, двумя или тремя авторами в отсылке указывают фамилию первого автора и сокращение «и др.» («et al.» для документов, на языках, применяющих латинскую графику); если авторы не указаны – указывают название документа; далее указывают год издания и при необходимости сведения дополняют указанием страниц. Сведения в отсылке разделяют запятой. Если отсылка содержит сведения о нескольких ссылках, группы сведений разделяют знаком точка с запятой. В отсылке допускается сокращать длинные заглавия, обозначая опускаемые слова многоточием с пробелом до и после этого предписанного знака.

Адрес редакции:

Россия, РСО-Алания, 362002, Россия, г. Владикавказ, ул. Маркова 93а, Геофизический институт ВНИЦ РАН, Редакция журнала «Геология и геофизика Юга России». Тел: 8 (8672) 76-19-28; факс: 8 (8672) 76-40-56, e-mail: southgeo@mail.ru

INFORMATION FOR AUTHORS

The journal “Geology and Geophysics of Russian South” publishes original articles of theoretical and methodological nature on geology, geophysics and geochemistry, the results of studying the composition and structure of the Earth’s crust and mantle, the formation processes and the general patterns of mineral resources, geophysical methods for their detection. The subject of the journal corresponds to the current nomenclature areas of knowledge of the Higher Attestation Commission of the Ministry of Education and Science of the Russian Federation: 25.00.03 – Geotectonics and geodynamics; 25.00.10 – Geophysics, geophysical methods of mineral exploration; 25.00.11 – Geology, prospecting and exploration of solid minerals, minerageny; 25.00.23 – Physical geography and biogeography, soil geography and landscape geochemistry; 25.00.35 – Geoinformatics; 25.00.36 – Geocology and related scientific directions..

For works of a regional nature, preference is given to articles that reveal the various issues of the geological structure of the South of Russia and adjacent territories.

According to the gradation of Sciences accepted in the international citation systems Scopus and Web of Science articles for publication in the journal “Geology and Geophysics of the South of Russia” are accepted by the following branches and groups of Sciences:

1. Earth and Planetary Sciences;
2. Environmental Science.

The journal “Geology and Geophysics of Russian South” publishes:

- articles interpreting the new scientific research results of volume not more than 10 typewritten pages including illustrations and tables;
- brief messages containing information on the important results of the preliminary research of volume 3-5 pages (these materials can be used in the full article text);
- reviews of the typewritten articles on the actual problems on current geological, geophysical and environmental problems of the South of Russia and adjacent territories, volume 20-25 pages by the editor’s order.

All papers must correspond to the journal theme. The presented manuscripts pass the preliminary and total reading stages and if necessary are sent back to the authors for the correction and finishing. The manuscripts are published in Russian and in English, the abstracts in Russian and in English as well. The journal publishes only the original articles. The author is fully responsible for the requirement. The manuscripts are not returned to the authors in case of being rejected in publication. The editor also does not return the materials sent. The editor has a right to make reductions and corrections of the article text. All corrections in the text and figures can be done by the authors only at the stage of the typesetting preparations. The infringement of the manuscript submission guidelines will lead to the article rejection. The publication is free of charge for authors of papers written by request of the publisher, and for graduate students. Reprinting is allowed only with the editorship permission with the obligatory references to the journal “Geology and Geophysics of Russian South”.

Instructions for the authors

Acceptance of materials for consideration is carried out through the electronic service <http://www.geosouth.ru> or by mail to the Publisher address: 93a, Markova Street, Vladikavkaz, Russia 362002, Geophysical Institute of VSC RAS, the editorial office of the journal “Geology and Geophysics of Russian South”.

The following materials should be presented:

- an article (structure and rules see below),

- a separate sheet with the information about the authors: surname, name, patronymic name, scientific degree, rank, a name of the organization, office and home address and telephone number, e-mail (if exists) and the reference to the author to contact with;
- a confirmation from the organization if the presented materials are the result of the work carried out in that organization; the journal heading (section) should be pointed out in the confirmation;
- an expert conclusion or any other document allowing the publication in the open press confirmed by the organization head and proved with the stamped seal; the expert conclusion is presented only by the authors from Russia.

If materials are submitted by electronic service, paper copies of the manuscript are not required to be submitted to the editorial office. When registering online, you must follow the step-by-step instructions for uploading files. When sending materials by regular mail, you must attach two paper copies of the article, signed by all authors. Text prepared in accordance with the general technical requirements is printed on one side of an A4 sheet. An annotation with the title, authors and their affiliation given at the beginning is printed on a separate sheet. Signatures to the figures are also provided separately. Each table and figure should be printed on a separate sheet. At the bottom of the page with an illustration, you must specify the number of the picture. It is also necessary to attach an electronic version on any portable storage device or, in agreement with the editors, send the relevant materials by e-mail.

The article lay-out rules (submission guidelines)

The following information should be pointed out on the first page: universal decimal classification, the article heading (title) in Russian (Sentence Case, without quotation marks, without division of a word, without a full stop at the end, underlining isn't used), point 20 semi bold, centre aligning; the authors surnames, academic degrees and titles (point 14 semi bold type, the right-edge aligning), the organization name, post address, town, country and e-mail of corresponding author.

The abstract should be 250-300 words without formulas and literature references. In case a manuscript is presented in Russian, the abstract should be repeated in English with the article heading (title), surnames and names in this language. In case a manuscript is presented in English, the Russian variant must be supplied. The abstracts are typed in Times New Roman (12 point) in one file in the following order: the article heading (title), the authors, the name of the organization, the abstract text in Russian with the further information in 2 lines in the same sequence in English. The abstracts are also published in the journal site www.naukagor.ru (in Russian and in English). Keywords (5-8) that reflect the theme of the article must be specified at the end of the abstract.

The article text is typed in Times New Roman (14 pt) through an ordinary interval aligning along the format. A subtitle is typed in italics, aligning along the left edge. The common terms, measurement units and conventional symbols similar to the whole article are used. The decoding of all symbols is given for the first text use. The Latin alphabet letters are typed in the italics while the Greek letters in the straight type. The mathematical symbols $\lim$, $\lg$, $\ln$, $\arg$, const , $\sin$, $\cos$, $\min$, $\max$, etc. are typed in the straight type. The symbol shouldn't coincide with the over symbol element in the chemical elements (H_2O) and measurement units (MW/cm^2) and must be of the straight (ordinary) type. One shouldn't mix similar written letters of the Latin, Greek and Russian alphabets and should use the proper macros. The letters I and J, v and υ , e and ℓ , h and n, q and g, V and U, O (letter) and 0 (zero) must differ in inscribing. There must be a sign of the continuous gap between a value figure meaning and its dimension. The hyphen is not used; the gap character also mustn't be used in the text for the lay-out. The formulas are designed with the help of the built-in

formulas processor (Microsoft Equation), the enumeration being done in the round brackets (2), aligned along the right edge; the decoding of all signs (letters) in the formulas is given in the order of the formula reference. To avoid the errors and misunderstandings, the editorial staff recommends the authors to use the Latin, Greek and other (not Russian) alphabet letters in the formulas and to keep to the omission sizes while the formulas printing. Large formulas must be divided into separate fragments. If possible, the fragments must be independent; each line is a separate object. The enumeration and punctuation marks should be put into an ordinary text separately from the formulas. The tables, pictures and photos are placed inside the text and must have a through numeration along the text (not by the sections!) and their own headings. The titles of all tables, pictures and photos are presented in Russian (11 point, italics). The numeration of the picture symbols is given in clockwise order or from up to down. The pictures should be done in the computer form, preferably in Corel Draw or compatible program using the following rules: a picture width – not more than 16.5 cm, a line thickness: the main – 1 pt, auxiliary – 0,5 pt; for the symbols in the picture area – «Times New Roman» type of 9 pt must be used. The vector pictures are written into the separate documentary files. The photo pictures must be contrast and performed on the mat paper. The scanned photos are written into the files of TIFF and JPEG format. To scan the image one should use the resolution of 300 dpi for the contrast black-white pictures and 600 dpi for semitone ones. The colour illustrations are admitted on the editorial agreement. All symbols, terms and illustrations should correspond to the operative standards.

The list of references is given in the general list at the end of the article. The list is compiled alphabetically (Harvard style); sources in Russian follow first, then in English. Literature in Russian should be issued in accordance with GOST R 7.0.5-2008. References to the literature in the text are given in square brackets in a line with the text of the document. If a link is given to a document created by one, two or three authors, in the reference indicate the name of the first author and the abbreviation “et al.”; if authors are not specified, the name of the document is indicated; further the year of publication is indicated and, if necessary, the information is supplemented with the indication of the pages. The information in the reference is separated by a comma. If the reference contains information about multiple links, the information groups are separated by a semicolon. It is allowed to abbreviate in a reference long titles, denoting dropped words with an ellipsis with space before and after this prescribed sign.

The editorial office address:

93a, Markova street, Vladikavkaz, Russia 362002, Geophysical Institute of VSC RAS, the editorial office of the journal «Geology and Geophysics of the South of Russia». Phone +7 (8672) 76-19-28; fax: +7 (8672) 76-40-56, e-mail: southgeo@mail.ru

**ГЕОЛОГИЯ И ГЕОФИЗИКА
ЮГА РОССИИ
(№ 4. 2020 г. Том 10)**

Главный редактор *В.Б. Заалишвили*

Подписано в печать 24.12.2020 г. Формат 60×84 1/8.

Дата фактического выхода 28.12.2020 г.

Усл. печ. лист 21,5. Гарнитура «Times».

Бумага офсетная. Печать цифровая. Тираж 100 экз. Заказ № 97.

Свободная цена.

Издание зарегистрировано в Федеральной службе по надзору в сфере связи, информационных технологий и массовых коммуникаций. Свидетельство ПИ № ФС77-72125 от 29 декабря 2017 г.

Издатель:

Геофизический институт – филиал ФГБУН Федерального научного центра
"Владикавказский научный центр Российской академии наук"

Адрес издателя и редакции:

362002, РСО-Алания, г. Владикавказ, ул. Маркова 93а

тел. 8 (8672) 764084; факс 8(8672) 764056

e-mail: southgeo@mail.ru

<http://geosouth.ru>

Отпечатано ИП Цопановой А.Ю.

362000, г. Владикавказ, пер. Павловский, 3

