



ISSN 2686-9993 (print)
ISSN 2686-7931 (online)
12+

НАУКИ О ЗЕМЛЕ И НЕДРОПОЛЬЗОВАНИЕ

Том
Vol. 43 № 3 2020

EARTH SCIENCES
AND SUBSOIL USE

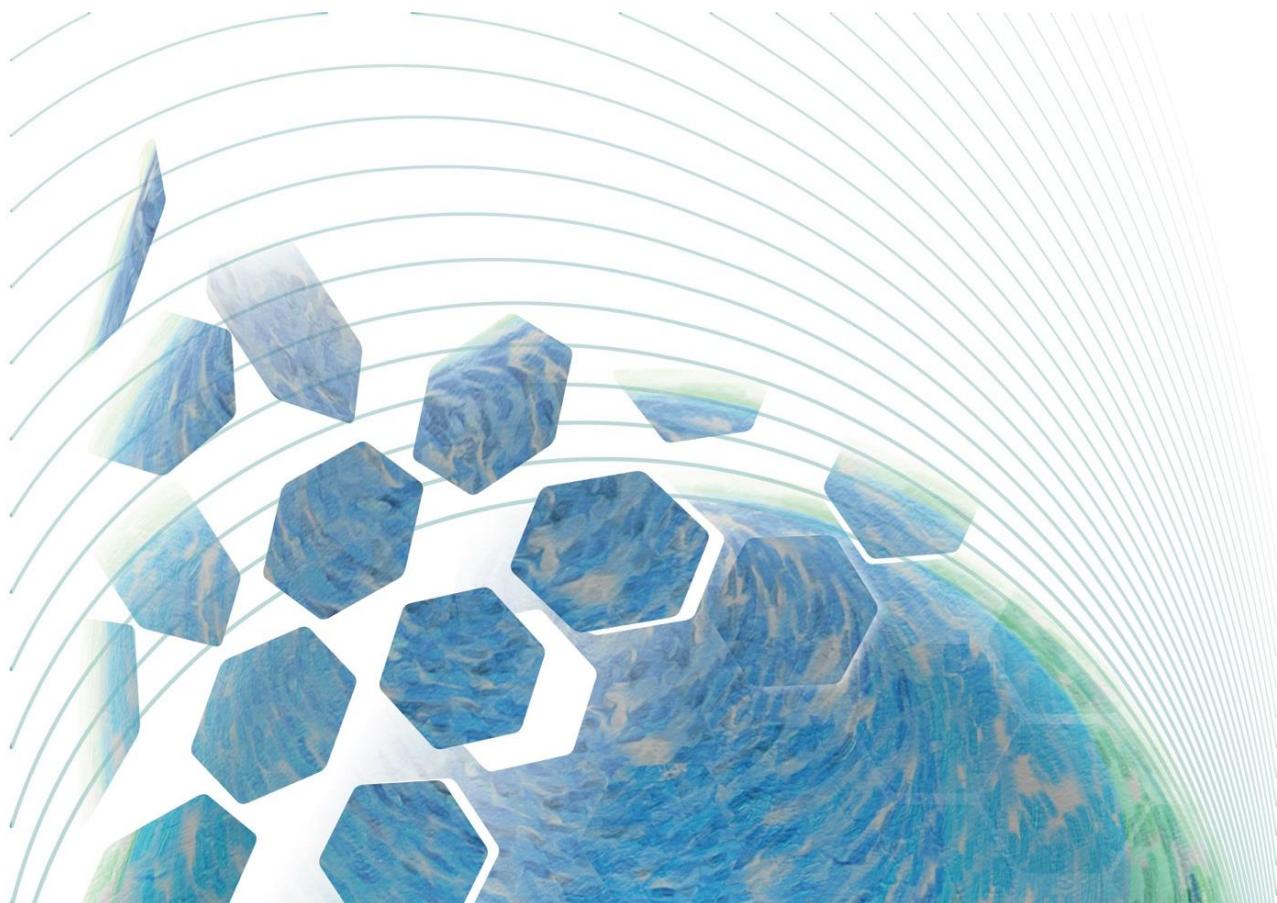
ISSN 2686-9993 (print)
ISSN 2686-7931 (online)

НАУКИ О ЗЕМЛЕ И НЕДРОПОЛЬЗОВАНИЕ

Том 43 № 3 2020
Vol. 43 № 3 2020

EARTH SCIENCES AND SUBSOIL USE

NAUKI O ZEMLE
I NEDROPOL'ZOVANIE



Редакционный совет

Кузьмин М.И., академик РАН, Институт геохимии СО РАН (г. Иркутск, Россия)
Гладкоуб Д.П., член-корр. РАН, Институт земной коры СО РАН (г. Иркутск, Россия)
Скляров Е.В., член-корр. РАН, Институт земной коры СО РАН (г. Иркутск, Россия)
Гордиенко И.В., член-корр. РАН, Геологический институт СО РАН (г. Улан-Удэ, Россия)
Корольков А.Т., д-р геол.-минерал. наук, проф., Иркутский государственный университет (г. Иркутск, Россия)
Макаров В.А., д-р геол.-минерал. наук, проф., Сибирский федеральный университет (г. Красноярск, Россия)
Очир Гэрэл, д-р геол.-минерал. наук, проф., Монгольский университет науки и технологии (г. Улан-Батор, Монголия)
Тальгамер Б.Л., д-р техн. наук, проф., Иркутский национальный исследовательский технический университет (г. Иркутск, Россия)
Ши Гуаньхай, проф., Геммологический институт Китайского геологического университета (г. Пекин, Китай)
Чжао Цзюньмэн, проф., Институт изучения Тибетского плато Китайской академии наук (г. Пекин, Китай)
Чжан Юнчжань, проф., Нанкинский университет (г. Нанкин, Китай)
Шигин А.О., д-р техн. наук, доцент, Сибирский федеральный университет (г. Красноярск, Россия)
Семинский К.Ж., д-р геол.-минерал. наук, Институт земной коры СО РАН (г. Иркутск, Россия)
Корняков М.В., д-р техн. наук, доцент, ректор, Иркутский национальный исследовательский технический университет (г. Иркутск, Россия)
Тимофеева С.С., д-р техн. наук, проф., Иркутский национальный исследовательский технический университет (г. Иркутск, Россия)
Зелинская Е.В., д-р техн. наук, проф., Иркутский национальный исследовательский технический университет (г. Иркутск, Россия)
Морин А.С., д-р техн. наук, проф., Сибирский федеральный университет (г. Красноярск, Россия)

Председатель редакционного совета:

Семинский Ж.В., д-р геол.-минерал. наук, проф., Иркутский национальный исследовательский технический университет (г. Иркутск, Россия)

Редакционная коллегия

Главный редактор:

Лобацкая Р.М., д-р геол.-минерал. наук, проф., зав. кафедрой ювелирного дизайна и технологий, Иркутский национальный исследовательский технический университет (г. Иркутск, Россия)

Заместители главного редактора:

Аузина Л.И., канд. геол.-минерал. наук, доцент, Иркутский национальный исследовательский технический университет (г. Иркутск, Россия)
Красноштанов С.Ю., канд. техн. наук, доцент, Иркутский национальный исследовательский технический университет (г. Иркутск, Россия)

Ответственный секретарь:

Храмовских В.А., канд. техн. наук, доцент, Иркутский национальный исследовательский технический университет (г. Иркутск, Россия)

Журнал «Науки о Земле и недропользование» имеет государственную регистрацию и входит в действующий Перечень изданий ВАК для публикации основных результатов диссертаций на соискание ученой степени кандидата наук, на соискание ученой степени доктора наук, включен в Научную электронную библиотеку (eLIBRARY.RU) для создания российского индекса научного цитирования, рассыпается в Российскую книжную палату, ВИНИТИ РАН. Журнал включен в научную электронную библиотеку CyberLeninka, в базы данных открытого доступа DOAJ, OAJI, в международный каталог периодических изданий Ulrich's Periodicals Directory, в базу данных EBSCO. Журнал распространяется по подписке в каталоге агентства ЗАО ИД «Экономическая газета» «Объединенный каталог Прессы России. Газеты и журналы», подписной индекс – 41538 (ОК+ЭК) (адрес агентства ЗАО ИД «Экономическая газета»: 8 (499) 1520989; izdatcat@ideg.ru). Статьи, опубликованные в журнале, реферируются и рецензируются. В журнал принимаются статьи по научному направлению «Науки о Земле».

Журнал создан в 2004 г. на основе межвузовского сборника «Геология, поиски и разведка месторождений рудных полезных ископаемых», который издавался с 1973 г. В 2004–2017 гг. журнал выходил под названием «Известия Сибирского отделения секции наук о Земле Российской академии естественных наук. Геология, поиски и разведка рудных месторождений», в 2017–2019 гг. – «Известия Сибирского отделения секции наук о Земле Российской академии естественных наук. Геология, поиски и разведка месторождений полезных ископаемых». В 2019 г. журнал переименован в «Науки о Земле и недропользование».

Периодичность выхода – 4 раза в год

Учредитель:
ФГБОУ ВО «Иркутский национальный исследовательский технический университет»

Журнал зарегистрирован
Федеральной службой по надзору в сфере
связи, информационных технологий
и массовых коммуникаций (Роскомнадзор)

Свидетельство о регистрации журнала:
ПИ № ФС77-76110 от 24.06.2019 г.

Адрес редакции, учредителя и издателя:
ФГБОУ ВО «Иркутский национальный
исследовательский технический университет»,
664074, Россия, г. Иркутск, ул. Лермонтова, 83

© ФГБОУ ВО «Иркутский национальный
исследовательский технический
университет», 2020

Editorial Council

Kuzmin M.I., Academician of the Russian Academy of Sciences, Institute of Geochemistry, SB RAS (Irkutsk, Russia)
Gladkochub D.P., Corresponding member of the Russian Academy of Sciences, Institute of the Earth's Crust, SB RAS (Irkutsk, Russia)
Sklyarov E.V., Corresponding member of the Russian Academy of Sciences, Institute of the Earth's Crust, SB RAS (Irkutsk, Russia)
Gordienko I.V., Corresponding member of the Russian Academy of Sciences, Geological Institute, SB RAS (Ulan-Ude, Russia)
Korolkov A.T., Dr. Sci. (Geol. & Mineral.), Professor, Irkutsk State University (Irkutsk, Russia)
Makarov V.A., Dr. Sci. (Geol. & Mineral.), Professor, Siberian Federal University (Krasnoyarsk, Russia)
Ochir Gerel, Dr. Sci. (Geol. & Mineral.), Professor, Mongolian University of Science and Technology (Ulan Bator, Mongolia)
Talgamer B.L., Dr. Sci. (Eng.), Professor, Irkutsk National Research Technical University (Irkutsk, Russia)
Shi Guanghai, Professor, School of Gemmology, Institute of China University of Geosciences (Beijing, China)
Zhao Junmeng, Professor, Institute of Tibetan Plateau Research, Chinese Academy of Sciences (Beijing, China)
Zhang Yongzhan, Professor, Nanjing University (Nanjing, China)
Shigin A.O., Dr. Sci. (Eng.), Associate Professor, Siberian Federal University (Krasnoyarsk, Russia)
Seminsky K.Zh., Dr. Sci. (Geol. & Mineral.), Institute of the Earth's Crust, SB RAS (Irkutsk, Russia)
Konyakov M.V., Dr. Sci. (Eng.), Rector, Irkutsk National Research Technical University (Irkutsk, Russia)
Timofeeva S.S., Dr. Sci. (Eng.), Professor, Irkutsk National Research Technical University (Irkutsk, Russia)
Zelinskaya E.V., Dr. Sci. (Eng.), Professor, Irkutsk National Research Technical University (Irkutsk, Russia)
Morin A.S., Dr. Sci. (Eng.), Professor, Siberian Federal University (Krasnoyarsk, Russia)

Chairman of the Editorial Council

Seminsky Zh.V., Dr. Sci. (Geol. & Mineral.), Professor, Irkutsk National Research Technical University (Irkutsk, Russia)

Editorial Board

Editor-in-Chief

Lobatskaya R.M., Dr. Sci. (Geol. & Mineral.), Professor, Head of the Jewelry Design & Technology Department, Irkutsk National Research Technical University (Irkutsk, Russia)

Deputy Editors-in-Chief

Auzina L.I., Cand. Sci. (Geol. & Mineral.), Associate Professor, Irkutsk National Research Technical University (Irkutsk, Russia)

Krasnoshtanov S.Yu., Cand. Sci. (Eng.), Irkutsk National Research Technical University (Irkutsk, Russia)

Executive secretary

Khramovskikh V.A., Cand. Sci. (Eng.), Associate Professor, Irkutsk National Research Technical University (Irkutsk, Russia)

The journal "Earth sciences and subsoil use" is officially registered and is on the current List of publications on the main results of candidate's and doctoral theses, the State Commission for Academic Degrees and Titles of the Russian Federation. It is included in the Scientific Electronic Library (eLIBRARY.RU) in order to create the Russian Science Citation Index. It is circulated to the Russian Book Chamber and the All-Russian Institute for Scientific and Technical Information of the Russian Academy of Sciences. The journal is included in CyberLeninka (the scientific electronic library), DOAJ, OAII (open-access databases), Ulrich's Periodicals Directory, and EBSCO database. It is distributed through the catalog of JSC "Economic Newspaper" Publishing House "The united catalog. Russian press. Newspapers and journals", the subscription index 41538 (OK+EC) (address of JSC "Economic Newspaper" Publishing House: 8 (499) 1520989; izdatcat@ideg.ru). The articles published in the journal are abstracted and peer-reviewed. The journal accepts articles related to the "Earth sciences" direction.

The journal was founded in 2004 on the basis of the Interuniversity collected papers "Geology, prospecting and exploration of ore mineral deposits" that had been published since 1973. In 2004–2017, the journal was published under the title "Proceedings of the Siberian Department of the Section of Earth Sciences of the Russian Academy of Natural Sciences. Geology, Prospecting and Exploration of Ore Deposits", and in 2017–2019, "Proceedings of the Siberian Department of the Section of Earth Sciences of the Russian Academy of Natural Sciences. Geology, Exploration and Development of Mineral Deposits". Since 2019, the title of the journal is "Earth sciences and subsoil use".

Periodicity: 4 times a year

Founder:
Federal State Budget Educational
Institution of Higher Education
'Irkutsk National Research Technical University'

The journal is registered
by the Federal Service for Supervision
of Communications, Information Technology,
and Mass Media (Roskomnadzor)

Journal Registration Certificate
PI no. FS77-76110 of June 24, 2019

Editorial Office Address: Federal State Budget
Educational Institution of Higher Education
"Irkutsk National Research Technical University",
83 Lermontov St., Irkutsk, 664074, Russia

© Federal State Budget Educational
Institution of Higher Education
"Irkutsk National Research
Technical University", 2020



СОДЕРЖАНИЕ

Содержание.....	286
Колонка главного редактора.....	288
Геология, поиски и разведка месторождений полезных ископаемых	
Дамдинова Л.Б., Дамдинов Б.Б. Минеральный состав и условия формирования руд Инкурского вольфрамового месторождения (Джидинское рудное поле, Юго-Западное Забайкалье).....	290
Лю Дэминь, Ян Вэйжань, Го Тайн, Жу Цзяньтао, Сюн Айминь. Обсуждение кайнозойской тектонической эволюции и динамики Южного Тибета.....	307
Агеенков Е.В., Ситников А.А., Воднева Е.Н. Влияние размеров установки на проявление низкочастотной дисперсии электромагнитных свойств земли в измерениях на акваториях с глубиной до 100 м.....	325
Разведка и разработка месторождений полезных ископаемых	
Буглов Н.А., Бутакова Л.А., Бочарников М.В. Проблемы использования облегченного цемента для крепления нефтегазовых скважин и пути их решения.....	339
Рапацкая Л.А. Влияние особенностей геологического строения Верхнечонского нефтегазоконденсатного месторождения на систему его разработки и эксплуатации.....	350
Мезин А.А., Шумскайтэ М.Й., Глинских В.Н., Голиков Н.А., Чернова Е.С. Фильтрационно-емкостные свойства бурового шлама по данным ядерно-магнитной резонансной релаксометрии и диэлектрической спектроскопии.....	364
Геэкология	
Чэн Хансинь, Пэн Минь, Чжао Чуаньдун, Хань Вэй, Ван Хуйянь, Ван Цяолинь, Ян Фань, Чжан Фугуй, Ван Чэнвэнь, Лю Фэй, Чжоу Ялун, Тан Шици, Ли Ко, Ян Кэ, Ян Чжэн, Чэн Сяомэн, Чэн Цзывань, Чжан Хуа, Мо Чуньху. Эпигенетическая геохимическая динамика и движущие механизмы закономерностей распределения химических элементов в почвах Юга-Западного Китая.....	375
Результаты полевых исследований	
Вантеева М.А., Устюжанин А.О., Сапрыкина М.И., Ярошук И.А., Масликов О.С., Ковтун К.К., Бабуева К.В., Семилет А.А., Гиренко Ю.Е., Тимашева В.В., Соболева С.М., Чжан Юнчжань, Аузина Л.И., Лобацкая Р.М., Войтюк А.А. Результаты учебно-производственной практики студентов Института недропользования Иркутского национального исследовательского технического университета (Россия) в Нанкинском Университете (Китай) (6–21 сентября 2019 г.).....	418
Ван Сюй, Ху Цинси, Кун Вэйчжэн, Чжан Чэнъян, Цзя Шань, Чан Юань, Дэн Вэй, Лишты А.В., Шиленков В.Г., Ли Чжунцю, Тянь Синзюнь. Корреляционный анализ между размещением муравейников и растительными ресурсами в Ольхонском регионе.....	436
К сведению авторов.....	447



CONTENTS

Contents..... 287

Chief Editor's Column..... 289

Geology, Prospecting and Exploration of Mineral Deposits

Damdinova L.B., Damdinov B.B. Mineral composition and formation conditions of the Inkur tungsten deposit ores (Dzhidinsky ore field, South-Western Transbaikalia)..... 290

Liu Demin, Yang Weiran, Guo Tieying, Ru Jiangtao, Xiong Aimin. Discussion on the Cenozoic tectonic evolution and dynamics of southern Tibet..... 307

Ageenkov E.V., Sitnikov A.A., Vodneva E.N. Influence of the probe dimensions on the display of the low-frequency dispersion of the earth's electromagnetic properties for measurements in marine waters up to 100 m deep..... 325

Exploration and Development of Mineral Deposits

Buglov N.A., Butakova L.A., Bocharkov M.V. Problems of the use of lightweight cement in oil and gas well fixing and possible solutions..... 339

Rapatskaya L.A. The features of the geological structure of the Verkhnechonsky oil and gas condensate field and their influence on the field development and operation system..... 350

Mezin A.A., Shumskayte M.Y., Glinskikh V.N., Golikov N.A., Chernova E.S. Reservoir properties of drill cutting by the nuclear magnetic resonance relaxometry and dielectric spectroscopy data..... 364

Geoecology

Cheng Hangxin, Peng Min, Zhao Chuandong, Han Wei, Wang Huiyan, Wang Qiaolin, Yang Fan, Zhang Fugui, Wang Chengwen, Liu Fei, Zhou Yalong, Tang Shiqi, Li Kuo, Yang Ke, Yang Zheng, Cheng Xiaomeng, Chen Ziwan, Zhang Hua, Mo Chunhu. Epigenetic geochemical dynamics and driving mechanisms of chemical elemental distribution patterns in soil in Southwest China..... 375

Results of Field Studies

Vanteeva M.A., Ustyuzhanin A.O., Saprykina M.I., Yaroshchuk I.A., Maslikov O.S., Kovtun K.K., Babueva K.V., Semilet A.A., Girenko Y.E., Timasheva V.V., Soboleva S.M., Zhang Yongzhan, Auzina L.I., Lobatskaya R.M., Voitiuk A.A. Results of the students' field study (Institute of Subsoil Use, Irkutsk National Research Technical University, Russia) at Nanjing University (China), September 6–21, 2019..... 418

Wang Xu, Hu Qingxi, Kong Weizheng, Zhang Chenyang, Jia Shan, Chang Yuan, Deng Wei, lishtva A.V., Shilenkov V.G., Li Zhongqiu, Tian Xingjun. The correlation analysis between ant mounds and plant resource in Olkhon region..... 436

Information for the Authors..... 447



Дорогие коллеги!

Осенний номер нашего журнала не нарушает сложившихся традиций в разностороннем освещении научных проблем геологии, которые касаются как регионов Сибири, так и сопредельных зарубежных стран, в данном случае Китая. Мы продолжаем публикацию статей на английском языке, существенно расширяя тем самым круг постоянных читателей журнала.

Год назад наша редакция подписала соглашение об обмене научными статьями открытого доступа с редакцией журнала *Earth Science Frontiers* Китайского геологического университета в Пекине, который занимает первое место в национальном рейтинге естественно-научных журналов Китая и входит в 1-2 Q индекса цитирования Scopus.

В этом номере журнала публикуются две статьи наших китайских коллег в обмен на две статьи сотрудников Иркутского национального исследовательского технического университета. В одной из них обсуждается кайнозойская тектоническая эволюция и динамика Южного Тибета, в другой рассматриваются вопросы геохимического распределения элементов в почвах Китая – чрезвычайно важный показатель для поиска месторождений полезных ископаемых. Статьи, предоставленные для китайского журнала российскими учеными, посвящены проблемам геологии цветных камней Сибирского региона.

Мы будем рады, если наши постоянные и новые авторы в дальнейшем представят нам свои статьи на английском языке для подобного обмена. Этим шагом Вы не только посодействуете повышению престижа нашего журнала, но в первую очередь существенно поднимите собственный индекс цитирования благодаря интересу международной научной общественности к вашим новым идеям и результатам исследований.

Редакция нашего журнала постоянно работает над повышением качества каждого выпуска. Мы благодарим всех, кто участвовал в процессе подготовки очередного номера журнала, ждем от Вас глубоких научных статей и будем всегда рады дальнейшему сотрудничеству.

**Лобацкая Раиса Моисеевна,
главный редактор**



Dear colleagues!

The present issue of the journal follows the established tradition in a diverse coverage of the research issues of geology concerning both Siberian regions and the adjacent countries, in this case, China. We go on publishing articles in English, thus essentially widening the circle of our regular readers.

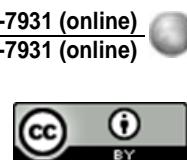
Last year, the Editorial Board of the journal signed the agreement on the exchange of open access scientific papers with the Editorial Board of the journal “Earth Science Frontiers” of China University of Geosciences, Beijing. The latter university is in the first place of the national rating of Chinese natural scientific journals and is included in 1-2 Q of the Scopus citation index.

The present issue includes two articles submitted by our Chinese colleagues within the framework of the agreement. One of the papers considers the Cenozoic tectonic evolution and dynamics of the Southern Tibet. The other one deals with the geochemical distribution of elements in the soils of China, an extremely important characteristic in prospecting for mineral deposits. The two articles submitted to the Chinese journal by Irkutsk National Research Technical University concern the geology of the gemstones of the Siberian region.

The authors are welcome to submit papers in English within the framework of this exchange agreement. Thus, you enhance the prestige of the journal and, more significantly, increase your citation index thanks to the rising interest of the world scientific audience in your new ideas and research results.

The Editorial Board of the journal is constantly working on increasing the quality of each issue. We are thankful to all who participated in the current issue publication. We are open to further cooperation and look forward to receiving deep scientific papers.

**Raisa Moiseevna Lobatskaya,
Editor-in-Chief**



Оригинальная статья / Original article

УДК 553.463

DOI: <http://dx.doi.org/10.21285/2686-9993-2020-43-3-290-306>

Минеральный состав и условия формирования руд Инкурского вольфрамового месторождения (Джидинское рудное поле, Юго-Западное Забайкалье)

© Л.Б. Дамдинова^a, Б.Б. Дамдинов^b^{a,b}Геологический институт СО РАН, г. Улан-Удэ, Россия

Резюме: Целью исследований являлось уточнение минерального состава и определение условий формирования кварц-губнеритовых прожилков Инкурского вольфрамового штокверкового месторождения Джидинского рудного поля (Юго-Западное Забайкалье). Авторами было проведено минералого-петрографическое описание рудных кварц-губнеритовых прожилков, а также электронно-микроскопические исследования минеральных ассоциаций, термобарогеохимические исследования, включающие крио-термометрию, спектроскопию комбинационного рассеяния света индивидуальных флюидных включений в кварце, флюорите, губнерите и мусковите. Проведенные минералого-петрографические исследования позволили уточнить минеральный состав руд Инкурского месторождения, определить последовательность формирования минеральных парагенезисов. Термобарогеохимическими исследованиями установлено, что рудоотложение шло с понижением температуры из относительно слабосоленых (~5,7–14,6 масс. % эквивалента хлорида натрия) гомогенных растворов, в солевом составе которых преобладали хлориды кальция с примесями хлоридов натрия, калия и магния. В газовой фазе включений идентифицированы углекислый газ и азот. Установлены как минимум две стадии минералообразования: высокотемпературная (≥ 300 °C) и низкотемпературная (≥ 200 –300 °C). Проведенные исследования позволили качественно оценить химический состав рудообразующих растворов. Установлено, что одним из главных факторов осаждения губнерита является снижение температуры.

Ключевые слова: Джидинское рудное поле, Инкурское штокверковое месторождение, вольфрам, флюидные включения, рудообразующие растворы

Благодарности: Исследования проведены с использованием оборудования Центра коллективного пользования «Аналитический центр минералого-геохимических и изотопных исследований Геологического института СО РАН» (г. Улан-Удэ). Работа выполнена в рамках бюджетного проекта Геологического института СО РАН № АААА-А16-116122110027-2 при частичной финансовой поддержке гранта РФФИ № 18-45-030002p_а.

Информация о статье: поступила в редакцию 07 мая 2020 г.; поступила после рецензирования и доработки 30 июля 2020 г.; принята к публикации 02 сентября 2020 г.

Для цитирования: Дамдинова Л.Б., Дамдинов Б.Б. Минеральный состав и условия формирования руд Инкурского вольфрамового месторождения (Джидинское рудное поле, Юго-Западное Забайкалье). *Науки о Земле и недропользование*. 2020. Т. 43. № 3. С. 290–306. <https://doi.org/10.21285/2686-9993-2020-43-3-290-306>

Mineral composition and formation conditions of the Inkur tungsten deposit ores (Dzhidinsky ore field, South-Western Transbaikalia)

© Lyudmila B. Damdinova^a, Bulat B. Damdinov^b^{a-g}Geological Institute, Siberian Branch of the Russian Academy of Sciences, Ulan-Ude, Russia

Abstract: The aim of the study is to clarify the mineral composition and determine the conditions of the formation of the quartz-hubnerite veins of the Inkur stockwork tungsten deposit (the Dzhidinsky ore field, South-Western Transbaikalia). The research methods include a mineralogical and petrographic description of the ore quartz-hubnerite veins; an electron microprobe analysis of the mineral associations; thermometry, cryometry, and Raman spectroscopy of the individual fluid inclusions in quartz, fluorite, hubnerite, and muscovite. The mineralogical and petrographic studies has made it possible to clarify the mineral composition of the Inkur deposit ores and determine the mineral paragenesis formation sequence. The fluid inclusion studies have established that the ore deposition was occurring in the relatively low-salinity (~5.7–14.6 wt. % eq. NaCl) homogeneous solutions due to a decrease of the temperature. The study of the salt composition of the solutions has identified Ca chloride as a prevailing component, with NaCl, KCl, and MgCl as admixtures. CO₂ and N₂ have been



identified in the gas phase of inclusions. Two stages of mineral formation have been defined: high-temperature (≥ 300 °C) and low-temperature (≥ 200 –300 °C). The conducted studies allow qualitative estimation of the chemical composition of the ore-forming solutions. It has been established that one of the main factors of the hubnerite deposition is a temperature factor.

Keywords: Dzhidinsky ore field, Inkur stockwork deposit, tungsten, fluid inclusions, ore-forming solutions

Acknowledgements: The study has been conducted with the use of the Shared Research Center “Analytical Center for Mineralogical-Geochemical and Isotope Research of the Geological Institute, Siberian Branch of the Russian Academy of Sciences” (Ulan-Ude). The work has been carried out within the government-funded project of the Geological Institute, Siberian Branch of the Russian Academy of Sciences № AAAA-A16-116122110027-2 with a partial financial support of the RFBR (Russian Foundation for Basic Research) grant № 18-45-030002p_a.

Information about the article: received May 07, 2020; revised July 30, 2020; accepted September 02, 2020.

For citation: Damdinova LB, Damdinov BB. Mineral composition and formation conditions of the Inkur tungsten deposit ores (Dzhidinsky ore field, South-Western Transbaikalia). *Nauki o Zemle i nedropol'zovanie = Earth sciences and subsoil use.* 2020;43(3):290–306. (In Russ.) <https://doi.org/10.21285/2686-9993-2020-43-3-290-306>

Введение

На территории Юго-Западного Забайкалья известны вольфрам-молибденовые месторождения Джидинского рудного поля, характеризующегося высокой концентрацией оруденения на небольшой площади. В состав рудного поля входят крупные промышленные месторождения: Первомайское, Инкурское и Холтосонское. Это уникальные геологические объекты и крупнейшие в России источники вольфрама и молибдена. В качестве примесных в рудах присутствует также и ряд других полезных компонентов: бериллий, кадмий, свинец, цинк, золото и др. Предшественниками установлено, что все три месторождения Джидинского рудного поля генетически связаны с единой гранитоидной интрузией. Формирование штокверковой вольфрам-молибденовой минерализации происходило в течение нескольких гидротермальных этапов, разделенных во времени периодами интрузивного магматизма. Считается, что сначала сформировался молибденовый штокверк (Первомайское месторождение), позже – прожилки с молибденово-бериллиевой минерализацией, затем – штокверк гюбнеритсодержащих прожилков (Инкурское месторождение) и кварц-гюбнеритовые жилы Холтосонского месторождения. Однако если последовательность образования этих месторождений была определена при геолого-разведочных и эксплуатационных работах, то современная информация о минеральном составе и условиях формирования каждого из выделенных типов оруденения практически отсутствует. В особенности это касается состава гидротермальных флюидов и таких парамет-

ров рудоотложения, как давление и температура. Минералогия руд была изучена ранее достаточно детально, но в связи с отсутствием на тот момент (60–70-е гг. XX в.) прецизионных методов микроанализа не все минеральные фазы были достоверно диагностированы. В целом для молибден-вольфрамовых месторождений физико-химические условия формирования до сих пор не исследовались достаточно детально, чтобы выявлять различия физико-химических параметров рудообразующих флюидов, при участии которых формируется вольфрамовая и молибденовая минерализация. Условия формирования и состав растворов, формировавших Первомайское молибденовое месторождение, считающееся самым ранним в ряду объектов Джидинского рудного поля, были изучены нами ранее [1]. Также был уточнен изотопный возраст молибденового оруденения и определены концентрации металлов в рудообразующих растворах.

В данном исследовании рассматривается Инкурское вольфрамовое месторождение. Оно является наиболее крупным месторождением вольфрама в России и относится к штокверковому геолого-промышленному типу. По запасам и содержанию триоксида вольфрама в рудах Инкурское месторождение сопоставимо с наиболее крупными месторождениями мира Хемердон (Великобритания), Пайн-Крик (США) и Ундуру-Цаган (Монголия) [2]. Целью исследований является уточнение минерального состава и определение условий формирования кварц-гюбнеритовых прожилков, образующих Инкурский штокверк.



Методы исследования

Для решения минералогических и петрографических задач применялись методы оптической микроскопии с использованием поляризационного микроскопа OLYMPUS BX-51 с цифровой фотокамерой MicroPublisher 3.3 RTV. Химический состав минералов определен в Геологическом институте СО РАН (г. Улан-Удэ) аналитиком Е.В. Ходыревой и кандидатом геолого-минералогических наук С.В. Канакиным при помощи сканирующего электронного микроскопа LEO-1430VP с энерго-дисперсионным спектрометром INCA Energy 350.

Флюидные включения (ФВ) в минералах исследовались методами термометрии, криометрии, волюметрии и спектроскопии комбинационного рассеяния света (КР-спектроскопии). Для определения температур общей гомогенизации, температур эвтектики и плавления льда водных растворов, температур растворения дочерних фаз и гомогенизации сжиженных газов использовалась микротермокамера THMSG-600 фирмы Linkam с диапазоном измерений температур от -196 до +600 °C. Стандартная аппаратурная ошибка измерений составляет $\pm 0,1$ в отрицательной и ± 5 °C в положительной области температур. Приблизительную оценку содержания солей во включениях находили по температуре плавления льда, используя двухкомпонентную водно-солевую систему (NaCl-H₂O) через эквивалент хлорида натрия [3]. Преобладающая соль в водном растворе включений определялась по температуре эвтектики, характеризующей водно-солевую систему [4].

Состав газовой фазы индивидуальных ФВ определен методом КР-спектроскопии в Институте геологии и минералогии имени В.С. Соболева СО РАН (г. Новосибирск) на одноканальном КР-спектрометре LabRamHR 800 с полупроводниковым детектором Horiba Scientific Symphony II и конфокальным микроскопом Olympus BX-41. В качестве возбуждающего использовано излучение аргонового лазера CVI Melles Girot с длиной волны 514 нм и выходной мощностью 30–50 мВт.

Объекты исследования

Джидинское рудное поле. Джидинское рудное поле представляет собой пример

крупного комплексного молибден-вольфрамового оруденения. На относительно небольшой площади здесь расположены три крупных месторождения. Разработка Джидинского рудного поля начиналась в 1934 г. старательскими артелями с одновременным строительством объектов горно-обогатительного производства. Со временем Великой Отечественной войны и до 1973 г. комбинат разрабатывал Первомайское молибденовое и Холтосонское вольфрамовое месторождения. С 1974 г. сырьевую базу составляют два вольфрамовых месторождения – жильное (Холтосон) и штокверковое (Инкур), отрабатываемые подземным (шахтным) и поверхностным (карьером) способами соответственно. Геология данного рудного поля изучалась многими исследователями: М.В. Бесовой [5], П.И. Нелетовым и др. [6], Е.Н. Смолянским [7], В.И. Игнатовичем [2, 8, 9], Е.П. Малиновским [10], Д.О. Онтоевым [11, 12], Е.Е. Батуриной, Г.С. Риппом [13], И.В. Гордиенко и др. [14], А.Н. Дистановой [15], П.Ю. Ходановичем, О.К. Смирновой [16, 17], И.В. Чернышевой и др. [18], Ф.Г. Рейфом, Е.Д. Бажеевым [19, 20], М.М. Повилайтис [21, 22], К.З. Стельмачонком [23, 24] и так далее.

Джидинское рудное поле расположено в юго-восточной части Западного Забайкалья, в пределах одноименной зоны палеозоид, в настоящее время представляющей собой сложно построенную покровно-складчатую область, геологическая структура которой определяется дислокациями позднепалеозойского этапа со значительной сдвиговой составляющей. В геологическом строении Джидинского рудного поля принимают участие хохюртовская осадочно-эффузивная свита, модонкульский диоритовый массив и многофазная Гуджирская гранитоидная интрузия.

Через центральную часть рудного поля проходит Джидинский глубинный разлом, имеющий субмеридиональное простиранье. Он трассируется зонами меланжа и бластомилонитизации общей мощностью 600–1000 м, включающими небольшие линзовидные крутопадающие тела измененных гипербазитов цакирского комплекса.

Хохюртовская свита занимает восточную часть данного рудного поля и сложена



песчаниками, сланцами, известняками, а также вулканитами основного и среднего состава.

Модонкульский интрузив является фрагментом крупного массива, вытянутого в северо-западном направлении, который, в свою очередь, слагается кварцевыми диоритами [16].

В пределах контакта палеозойских кварцевых диоритов Модонкульского массива с эфузивно-осадочными толщами сформировалась Гуджирская интрузия, с которой традиционно связывается образование многоэтапного комплексного молибден-редкометалльно-вольфрамового оруденения рассматриваемого рудного поля. Интрузия представлена на поверхности многочисленными дайками преимущественно кислого состава

и Первомайским штоком гранит-порфиров (рис. 1). Среди пород дайкового комплекса выделяются дайки серых сиенитов, серых кварцевых сиенит-порфиров, керсантидов, бостонитов и гранит-порфиров. Небольшое распространение характерно для серых кварцевых сиенит-порфиров и сиенитов, значительно уступают им по количеству керсантиды, бостониты и гранит-порфирь. Дайки имеют северо-западное, субширотное, северо-восточное и субмеридиональное простирание при углах падения от 30° и более. Реже отмечаются субгоризонтальные тела. При пересечениях разновозрастных даек отмечаются сбросовые перемещения малых амплитуд, не превышающие первые метры.

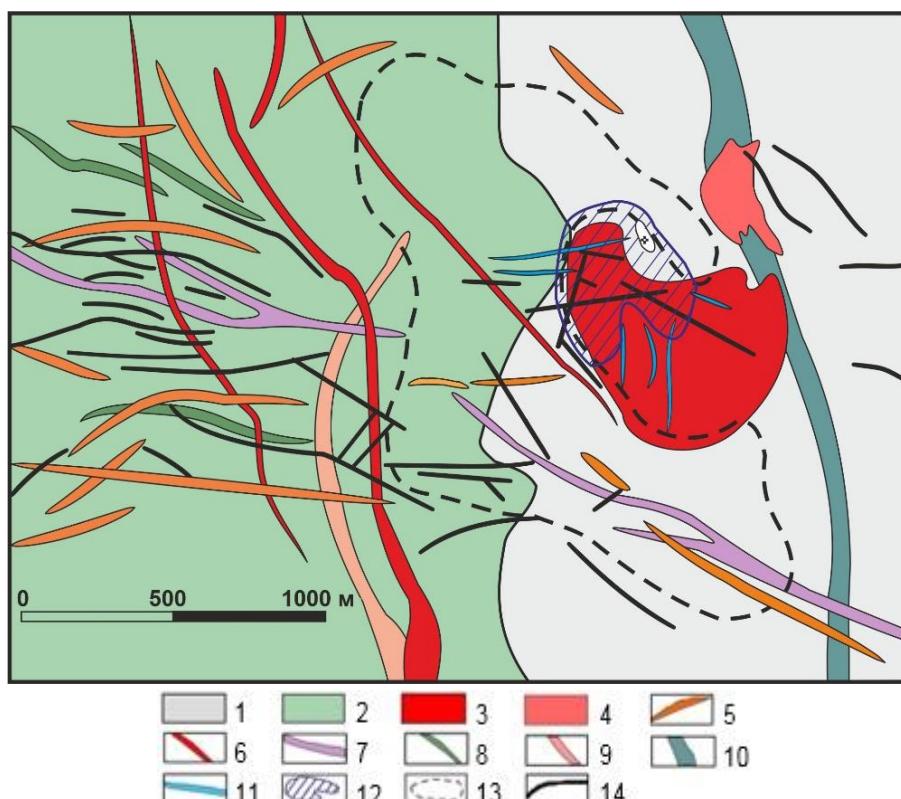


Рис. 1. Схематическая геологическая карта Джидинского рудного поля (по В.И. Игнатовичу, 1975):

- 1 – хохортовская свита: эфузивы; 2 – Модонкульский массив: диориты, кварцевые диориты; 3 – Первомайский массив: гранит-порфирь; 4 – Горкинский гранитный массив; 5 – серые сиениты; 6 – дайки гранит-порфиров; 7 – дайки бостонитов; 8 – микродиориты; 9 – плагиограниты; 10 – Джидинский глубинный разлом; 11 – кварц-молибденитовые жилы; 12 – Первомайский молибденовый штокверк; 13 – Инкурский вольфрамовый штокверк; 14 – кварц-сульфидно-гюбнеритовые жилы

Fig. 1. Schematic geological map of the Dzhidinsky ore field (Vladimir I. Ignatovich, 1975):

- 1 – Khokhyurt suite: effusives; 2 – Modonkul massif: diorites, quartz diorites; 3 – Pervomaisky massif: granite-porphyr; 4 – Gorkinsky granitoid massif; 5 – gray syenites; 6 – dykes of granite porphyry; 7 – dikes of bostonites; 8 – microdiorites; 9 – plagiogranites; 10 – Dzhidinsky deep fault; 11 – quartz-molybdenite veins; 12 – Pervomaisky molybdenum stockwork; 13 – Inkur tungsten stockwork; 14 – quartz-sulfide-hubnerite veins



Определяющую роль в размещении оруденения сыграли местные разломы субширотного, северо-западного, северо-восточного и субмеридионального простирания, которые наследуют направления более ранних разрывов, трассирующихся в вулканитах телами гипербазитов, а в кварцевых диоритах – зонами бластомилонитизации и метасоматоза, дайками. Для рудовмещающих разломов, являющихся элементами региональной сети трещиноватости, характерны малоамплитудные сбросовые перемещения. Они, в свою очередь, трассируются зонами брекчирования и метасоматических изменений пород.

Первомайский шток гранит-порфиров является самым крупным выходом Гуджирской интрузии на поверхность. Площадь выхода Первомайского массива на дневную поверхность составляет 0,35 км². По данным буровых и геофизических работ, Первомайский массив представляет собой лакколитообразное тело с многочисленными апофизами, которое вытянуто в северо-западном направлении и погружается на юго-восток согласно кровле Модонкульского массива. В апикальной его части отмечаются ксенолиты гранитов и граносиенитов, залегающих глубже, а также ксенолиты кровли, свидетельствующие о небольшой глубине эрозионного среза массива.

Предшественниками установлено, что все три месторождения Джидинского рудного поля генетически связаны с единой Гуджирской гранитоидной интрузией [19, 20 и др.]. Формирование штокверковой молибден-вольфрамовой минерализации происходило в течение нескольких гидротермальных этапов, разделенных во времени периодами интрузивного магматизма. Минерализация каждого последующего гидротермального этапа имеет специфическую рудную нагрузку, наследуя в то же время некоторые черты предыдущего. Сначала сформировался молибденовый штокверк (Первомайское месторождение), позже – прожилки с молибден-бериллиевой минерализацией, затем – штокверк гибнерит-содержащих прожилков (Инкурское месторождение) и кварц-гибнеритовые жилы (Холтосонское месторождение).

Молибденовое оруденение приурочено к апикальной части Первомайского штока, вольфрамовое – к многочисленным кварцевым жилам западной части рудного поля (Холтосонское месторождение) и к штокверкам в центральной части (Инкурский штокверк). В жильном поле известно более 200 жил среднего и крутого падения; размеры промышленных жил по простиранию и падению колеблются в широких пределах при мощности от десятых долей до 3–4 м, в раздувах – до 15 м.

Последние изотопно-геохронологические данные о возрасте цирконов (124±2 млн лет) из гранит-порфиров Первомайского штока, мусковита (127,6±1,5 млн лет) и молибденита (118,5±1,6 и 122,4±1 млн лет) из рудных зон Первомайского молибденового месторождения свидетельствуют о генетической связи процессов гранитообразования и молибденового рудоотложения на рубеже 119–128 млн лет назад [1].

Геологическое строение Инкурского месторождения. Инкурское штокверковое месторождение вольфрамовых руд расположено в 7 км к юго-востоку от г. Закаменска республики Бурятия. Детальная разведка месторождения проводилась в 1967 г. геологами М.Н. Хулугуровым и С.С. Тентиловым для утверждения промышленных запасов. Оно разрабатывалось открытым способом с 1973 г. и вскрыто на поверхности одноименным карьером (рис. 2, а).

Месторождение обрамляет Первомайский массив гранит-порфиров в форме полукольца с юго-западной, западной и северо-западной сторон (см. рис. 1). Рудные прожилки, образующие штокверк, залегают в кварцевых диоритах Модонкульского массива и частично – в метаморфизованных осадочно-вулканогенных породах хохютовской свиты. Штокверк протягивается приблизительно на 2500 м при ширине 800–850 м и разведен на глубину 470–500 м.

Сложная структура Инкурского штокверка обусловлена наличием разрывных зон различного происхождения и возраста [16]. Основное значение в большей части штокверка принадлежит крутопадающим линейным зонам субширотного и субмеридионального простирания.



На локализацию вольфрамовой минерализации кроме определяющих структурных факторов влияют литолого-петрографические особенности вмещающих пород. Например, в зоне экзоконтакта Модонкульского массива кварцевых диоритов, насыщенной ксенолитами метавулканитов хохюртовской свиты, отмечается угнетение линейных штокверковых зон [16]. Пологая кровля Модонкульского массива, сложенная метавулканитами, способствует развитию в породах массива разрывных нарушений, обусловивших концентрацию как штокверкового и жильно-прожилкового оруденения, так и вольфрамово-рудных жил Холтосонского месторождения.

Детальные структурные исследования Инкурского штокверка выявили радиально-концентрическую структуру месторождения, связанную с образованием крупного сводового поднятия в кварцевых диоритах под действием вертикальных напряжений, в частности давлений магматических масс со стороны глубинных частей предполагаемого очага. В этих условиях одновременно раскрывались радиальные и концентрические трещины, в которых отлагались рудные и жильные минералы [16].

Результаты исследований

Минеральный состав кварц-гюбнеритовых прожилков. Руды Инкурского месторождения представлены многочисленными кварцевыми (рис. 2, с–е) и кварц-мусковитовыми (рис. 2, f) жилами и прожилками с рудной минерализацией, густая сеть которых обуславливает образование штокверкового оруденения (рис. 2, b). Все прожилки характеризуются наличием раздувов и пережимов мощности. Промышленное оруденение в штокверке распределено весьма неравномерно. Наиболее обогащенные гюбнеритом участки (см. рис. 2, d, e) отмечаются на южном и северном флангах, а для центральной части характерно относительно слабое оруденение (см. рис. 2, с). Кроме этого, участки с повышенным содержанием вольфрамита пространственно тяготеют к раздувам прожилков, что отмечалось и предшественниками [9].

Большая часть вольфрамоносных прожилков имеет мощность 1–3 см (см. рис. 2, с–f),

протяженность прожилков, как правило, достигает первых метров. Границы прожилков с вмещающими породами достаточно резкие. Наличие минералов (мусковит, гюбнерит), растущих от стенок прожилков к центральным частям (см. рис. 2, e, f), а также резкость границ прожилков с вмещающими породами свидетельствуют о том, что прожилки формировались путем выполнения.

Вмещающие породы в экзоконтактах рудных прожилков интенсивно превращены в березиты, причем березитизация подвержены как гранитоиды, так и метапесчаники вулканогенно-осадочной толщи, а также дайковые образования. Березиты и березитизированные породы образуют жило- или линзообразные тела с нечеткими границами, имеют размеры от первых сантиметров до первых десятков метров по мощности [16]. Березитизация выражается в появлении кварц-мусковитовой ассоциации с пиритом, карбонатом и флюоритом, замещающей первичные породы, причем с удалением от прожилков степень березитизации снижается (см. рис. 2, b, c).

Минеральный состав прожилков показан в табл. 1. Основные жильные минералы представлены кварцем, мусковитом, флюоритом и редким бериллом.

Главный минерал – кварц (~50–90 %) – является сквозным минералом, то есть образуется на всех стадиях минералообразования от ранней к поздней.

Мусковит (~5–30 %) имеет зеленоватую окраску и преимущественно приурочен к зальбандовым частям прожилков (см. рис. 2, f), как правило, растет перпендикулярно от стенок к центральным частям, кроме этого встречаются и более редкие чешуйки мусковита в центральных частях прожилков. Отмечается, что в маломощных (≤ 1 см) прожилках «призальбандовый» относительно крупночешуйчатый мусковит встречается чаще и количественно его больше (см. рис. 2, f), тогда как в относительно мощных прожилках (≥ 2 –3 см) мусковит в оторочках отмечается в меньших количествах (см. рис. 2, с–е).

Флюорит (≤ 2 –10 %) распространен весьма неравномерно и слагает, как правило, агрегаты небольших размеров и отдельные зерна неправильной формы среди зерен кварца.

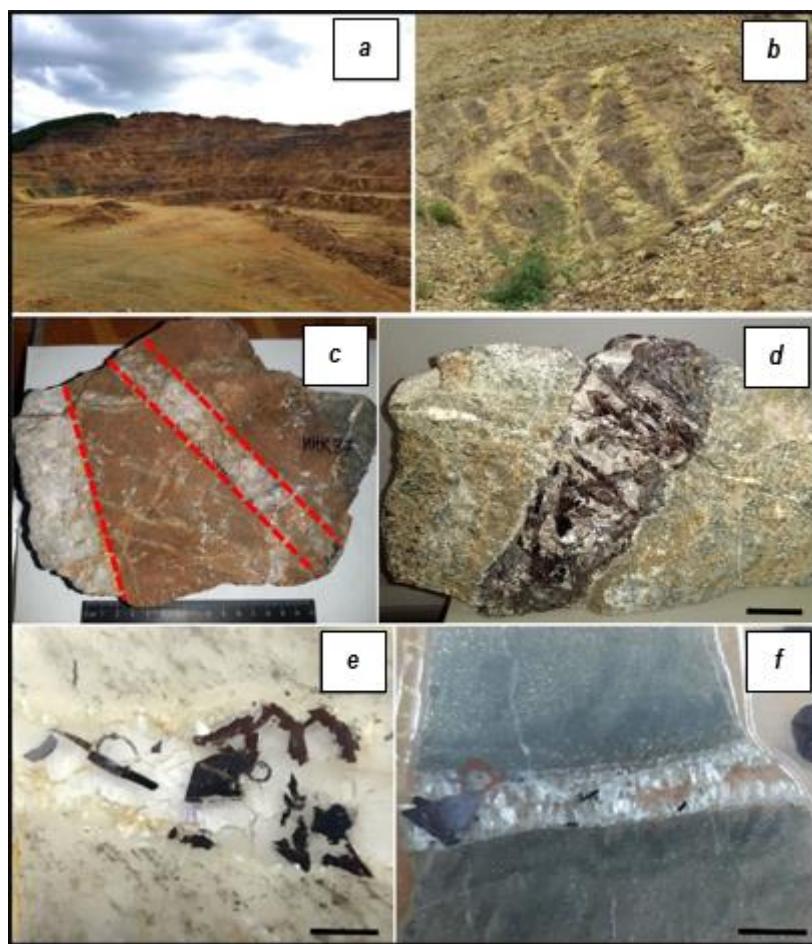


Рис. 2. Фотографии карьера, штокверка и рудных прожилков Инкурского вольфрамового месторождения:

а – Инкурский карьер; б – штокверковое оруднение в стенке Инкурского карьера;
с – кварцевые прожилки с редкими зернами гюбнерита; д – богатый гюбнеритом кварцевый прожилок (образец Геологического музея Бурятского научного центра СО РАН); е – полированная пластина кварц-гюбнеритового прожилка с мусковитом в оторочках; ф – кварцевый прожилок, обогащенный мусковитом в зальбандовых частях с редкими кристаллами гюбнерита, фото пластины
Длина масштабной линейки – 1 см

Fig. 2. Photos of the quarry, stockwork and ore veinlets of the Inkur tungsten deposit:

a – Inkur quarry; b – stockwork mineralization in the wall of the Inkur quarry;
c – quartz streaks with rare grains of hubnerite; d – quartz vein rich in hubnerite
(a sample of the Geological Museum of the Buryat Scientific Center, SB RAS); e – a polished plate
of quartz-hubnerite vein with muscovite in the rims; f – quartz vein, enriched with muscovite
in the selvage parts with rare crystals of hubnerite, photo of the polished plate
The length of the scale bar is 1 cm

Берилл ($\leq 1\text{--}2\%$) встречается в виде единичных зерен в кварцевых прожилках как акцессорная фаза.

Распределение рудной минерализации в прожилках крайне неравномерное, от фактически безрудных до обогащенных рудными минералами (до $\sim 40\text{--}50\%$) участков.

Главный рудный минерал представлен марганцевой разновидностью вольфрамита – гюбнеритом – с содержанием марганца – 16,9–17,5 масс. %, Fe – $<0,59$ масс. %. Гюбне-

рит, как правило, образует кристаллы вытянутой шестоватой или столбчатой формы (см. рис. 2, д, е; рис. 3, а) красновато-бурового цвета, участками растущие от стенок прожилков, либо скопления кристаллов неправильной формы. Реже гюбнерит встречается в виде отдельных зерен неправильной формы.

Широко развиты на месторождении сульфидные минералы, среди которых преобладают пирит, сфалерит, галенит и халькопирит (рис. 3).



Таблица 1. Минеральный состав кварц-гюбнеритовых прожилков
Table 1. Mineral composition of quartz-hubnerite veinlets

Ассоциация	Минерал		
Жильные минералы	Главные	Кварц: SiO_2	
	Второстепенные	Флюорит: CaF_2	
		Мусковит: $\text{KAl}_2[\text{AlSi}_3\text{O}_{10}](\text{OH})_2$	
Рудные минералы	Главные	Гюбнерит: MnWO_4	
		Пирит: FeS_2	
		Халькопирит: CuFeS_2	
	Второстепенные	Сфалерит: ZnS	
		Галенит: PbS	
		Тетраэдрит: Cu_3SbS_3	
		Айкинит: PbCuBiS_3	
		Молибденит: MoS_2	
		Кассiterит: SnO_2	
		Шеелит: CaWO_4	
	Редкие	Гессит: Ag_2Te	
		Борнит: Cu_5FeS_4	
		Берилл: $\text{Al}_2[\text{Be}_3(\text{Si}_6\text{O}_{18})]$	
Вторичные минералы		Англезит: PbSO_4	
		Ковеллин: CuS	

Пирит присутствует в двух генерациях, различающихся по морфологии. Пирит первой генерации встречается в виде интенсивно корродированных зерен, замещаемых более поздними минералами – галенитом, сфалеритом, блеклой рудой и др. (см. рис. 3, *b,c*). Пирит второй генерации присутствует в форме кубических кристаллов в ассоциации с тетраэдритом (см. рис. 3, *e*).

Халькопирит встречается в тесных срастаниях с галенитом и сфалеритом, также присутствует в виде оторочек по краям зерен тетраэдрита (см. рис. 3, *e*).

Галенит характеризуется наличием примесей серебра и висмута, содержания которых достигают высоких концентраций: до 6,69 масс. % – серебро, до 6,69 масс. % – висмут, что позволяет отнести его к серебро-висмут-содержащему галениту.

Сфалерит практически не содержит в своем составе железа, в качестве примеси установлен лишь кадмий (0,49–0,96 масс. %). В сфалерите отмечаются единичные включения мелких кристаллов кассiterита.

В виде единичных зерен в рудах присутствует борнит.

Молибденит отмечается в виде одиночных мелких чешуек в краевых частях прожилков в агрегатах мусковита и кварца. Также на более

глубоких горизонтах в прожилках предшественниками отмечались чешуйки молибденита, образующие мелкую вкрапленность в микроклиновых и мусковитовых призальбандовых оторочках. Считается, что это переотложенный молибденит из более ранних молибденитов содержащих кварц-альбитовых прожилков [10, 11].

Наряду с молибденитом отмечался и шеелит – как на ранней, так и на более поздней стадии при замещении кристаллов гюбнерита.

Сульфосоли в большей степени представлены тетраэдритом и айкинитом. Айкинит преимущественно слагает выделения неправильной формы в зернах галенита (см. рис. 3, *d,f*, белый пунктир).

Тетраэдрит образует относительно крупные агрегаты неправильной формы (см. рис. 3, *e*) либо отдельные зерна изометричной формы (см. рис. 3, *f*). Среднее содержание сурьмы в тетраэдрите – 20,65, мышьяка – 5,64 масс. %, кроме того, в его составе присутствуют: железо – 0,62, цинк – 7,30, серебро – 0,74 масс. %, в некоторых зернах обнаружены примеси висмута (до 1,59 масс. %). В виде многочисленных микровключений в тетраэдрите присутствует теллурид серебра – гессит (см. рис. 3, *g*, белый пунктир).

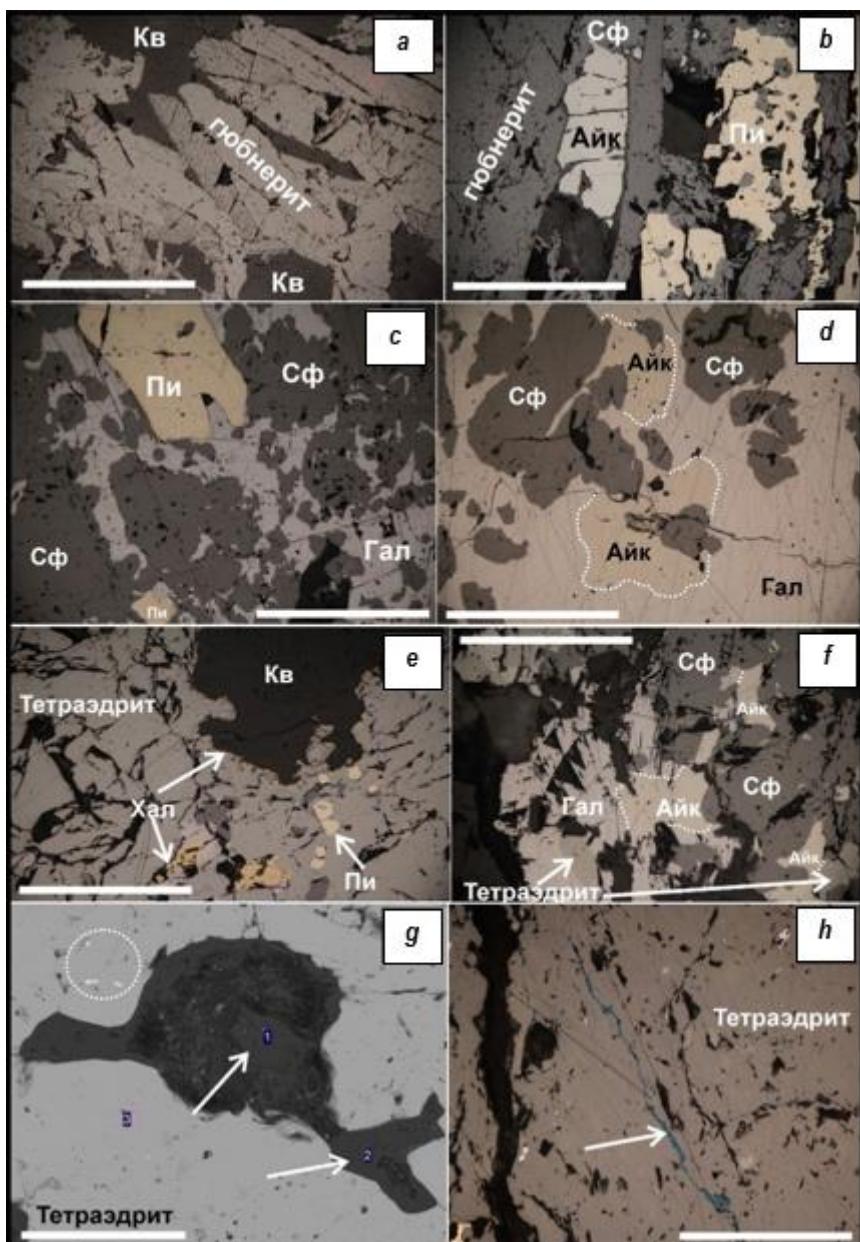


Рис. 3. Морфология и взаимоотношения рудных минералов в кварц-гюбнеритовых прожилках Инкурского месторождения (фотографии анишлифов):

а – скопления шестоватых кристаллов гюбнерита; б – срастания гюбнерита, сфалерита, айкинита и пирита; в – тесные срастания сфалерита и галенита; г – выделения айкинита (белый пунктир) в зерне галенита; д – агрегаты тетраэдрита в срастании с кварцем и мелкими зернами халькопирита и пирита; е – айкинит (белый пунктир) в зерне галенита на контакте со сфалеритом и тетраэдритом; ж – зерно розенбергита(?) (стрелки) в тетраэдрите, в пунктире показаны микровключения гессита (фото в обратно-рассеянных электронах); з – прожилок ковеллина в тетраэдрите

Кв – кварц; Пи – пирит; Гал – галенит; Хал – халькопирит; Сф – сфалерит; Айк – айкинит

Длина масштабной линейки – 0,5 мм, на фото ж – 200 мкм, на фото з – 0,1 мм

Fig. 3. Morphology and relationship of the ore minerals in the quartz-hubnerite veins of the Inkurskoe deposit (photos of polished sections):

а – clusters of columnar hubnerite crystals; б – intergrowths of hubnerite, sphalerite, aikinite and pyrite; в – close intergrowths of sphalerite and galena; г – aikinite deposition (white dashed line) in galena grain; д – aggregates of tetrahedrite in the intergrowth with quartz and small grains of chalcopyrite and pyrite; е – aikinite (white dotted line) in the galena grain in contact with sphalerite and tetrahedrite; ж – rosenbergite grain(?) (arrows) in tetrahedrite, the dotted line shows the microinclusions of hessite (photo in backscattered electrons); з – veins of covellite in tetrahedrite

Кв – quartz; Пи – pyrite; Гал – galena; Хал – chalcopyrite; Сф – sphalerite; Айк – Aikinit

The scale bar is 0.5 mm long; in photo ж, 200 microns; in photo з, 0.1 mm



В тетраэдрите в одном участке идентифицирован редкий необычный минерал из класса галогенидов – гидрофторид алюминия, по составу близкий розенбергиту ($\text{AlF}[\text{F}_{0,5}(\text{H}_2\text{O})_{0,5}]_4 \cdot \text{H}_2\text{O}$) (см. рис. 3, *g*), который образует зерна неправильной формы с округлыми очертаниями.

Сульфосоли образуют совместные парагенетические ассоциации с сульфидами – галенитом, сфалеритом, халькопиритом, пиритом II, что позволяет сделать вывод о синхронности формирования этих минералов.

К вторичным минералам относятся англезит и ковеллин (см. рис. 3, *h*), заполняющие маломощные поздние трещины.

Также предшественниками были идентифицированы такие минералы, как топаз ($\text{Al}_2[\text{SiO}_4](\text{F},\text{OH})_2$), линдстремит ($\text{Pb}_3\text{Cu}_3\text{Bi}_7\text{S}_{15}$), хаммарит ($\text{Pb}_2\text{Cu}_2\text{Bi}_4\text{S}_9$), сульфовисмутит меди и серебра [25] и редкие теллуриды серебра и золота (петцит, гессит и сильванит) в ассоциации с самородным золотом.

На основе петрографических наблюдений и данных электронной микроскопии установлена схематичная общая последовательность отложения жильных и рудных минералов в прожилках, которая представлена на рис. 4.

Термобарогеохимические исследования. Данные об условиях формирования и составе рудообразующих растворов вольфрамового оруденения Инкурского месторождения полу-

чены в результате изучения ФВ из кварца, флюорита и гюбнерита, а также мусковита из кварц-гюбнеритовых прожилков. В этих минералах найдены включения с наиболее пригодными размерами для изучения методами термометрии и криометрии. В зернах кварца, как правило, доминируют вторичные включения, которые залечивают многочисленные трещины (рис. 5, *a*). Очень редко в кварце встречаются отдельные первичные двухфазовые включения (жидкость + газ) размером в среднем от 10 до 25 мкм (рис. 5, *b,d–f*) или группы первичных включений (рис. 5, *c*), удаленные от залеченных трещин и шлейфов вторичных включений.

В редких зернах флюорита также обнаружены первичные ФВ, как правило, одиночные (размером ~15–25 мкм), которые часто (кроме газовой фазы и водного раствора) содержат очень мелкую темную фазу (рис. 5, *g,h,i*) неизвестного состава.

Кроме этого, в кристаллах гюбнерита отмечаются многочисленные включения, как правило, газовые (рис. 5, *j*). В некоторых зернах обнаружены очень редкие одиночные двухфазовые (жидкость + газ) включения (рис. 5, *k*) небольших размеров (~7–12 мкм).

В мусковите найдены единичные группы очень мелких двухфазовых (жидкость + газ) ФВ, похожих на первичные (рис. 5, *l*) размером ≤10 мкм.

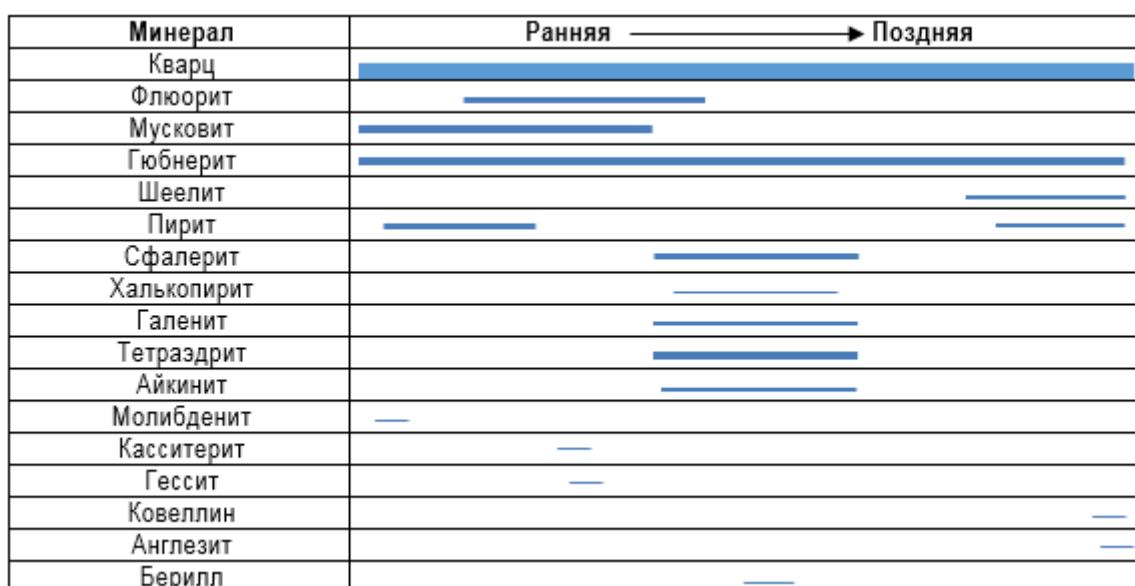


Рис. 4. Последовательность минералообразования в рудных прожилках Инкурского штокверка
Fig. 4. Mineral formation sequence in the ore veins of the Inkur stockwork

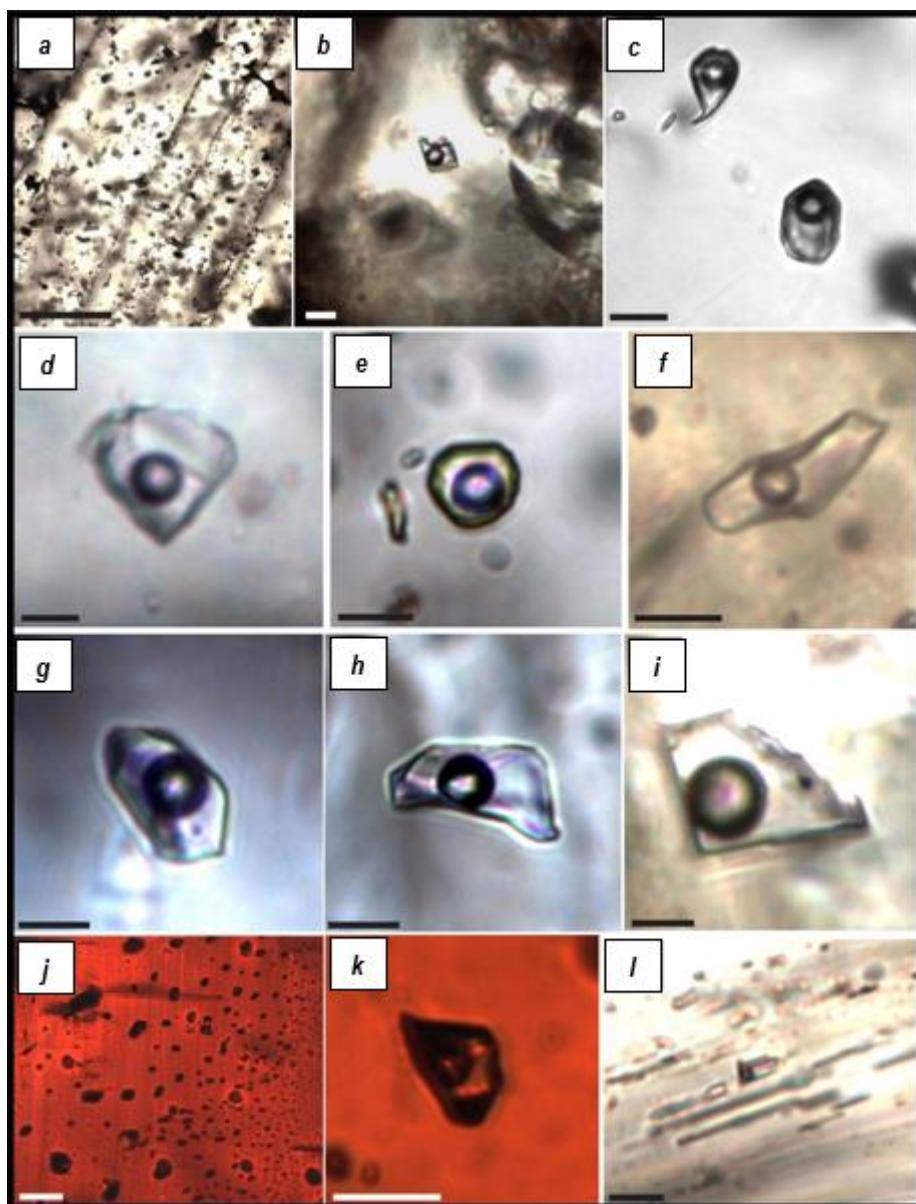


Рис. 5. Первичные гомогенные флюидные включения из кварц-гюбнеритовых прожилков Инкурского месторождения:

а – зерно кварца с «цепочками» вторичных включений; б–ф – первичные двухфазовые флюидные включения в зернах кварца; г–и – первичные включения с мелкими темными фазами во флюорите; ж – группа газовых флюидных включений в зерне гюбнерита; к – первичное одиночное двухфазовое флюидное включение в гюбнерите; л – группа мелких флюидных включений в мусковите

Длина масштабной линейки на фото а – 100 мкм, на фото б–л – 10 мкм

Fig. 5. Primary homogeneous fluid inclusions from quartz-hubnerite veinlets of Inkurskoe deposit:

а – quartz grain with "chains" of secondary inclusions; б–ф – primary two-phase fluid inclusions in quartz grains; г–и – primary inclusions with small dark phases in fluorite; ж – group of gas inclusions in the hubnerite grain; к – primary single two-phase inclusion in hubnerite; л – group of small fluid inclusions in muscovite

The scale bar in photo а is 100 microns; in photos б–л, 10 microns

Почти все включения относятся к ФВ гомогенного захвата, как правило, для них характерно отсутствие твердых фаз за исключением зерен флюорита.

Результаты термометрического и криометрического изучения ФВ обобщены в табл. 2.

Интервал температур гомогенизации изученных первичных включений в жильном кварце из кварц-гюбнеритовых прожилков варьирует от 343 до 195 °С (см. табл. 2; рис. 6). Температуры эвтектики в большинстве включений из кварца меняются от ~52 до -49,2 °С,



Таблица 2. Общая таблица результатов микротермометрических исследований флюидных включений в минералах Инкурского месторождения
Table 2. Summary table of microthermometric studies of fluid inclusions in the minerals of the Inkur deposit

Минерал-хозяин	T_e , °C	$T_{пл\ льда}$, °C	$T_{зет}$, °C	$T_{пл\ тв\ фаз}$, °C	Соленость эквивалента хлорида натрия, масс. % [4]	Тип солевой системы [4]
Кварц	≥195...343	-4,2...-10,6	-52...-50...-49,2 (-23,4...-23 – ускорение таяния льда)	–	6,7–14,6	$\text{CaCl}_2\text{-MgCl}_2\text{-H}_2\text{O}$ $\text{CaCl}_2\text{-KCl-H}_2\text{O}$ $\text{CaCl-H}_2\text{O}$ $\text{NaCl-KCl-H}_2\text{O}$
Флюорит	≥195...265	-7...-3,8	-55...-49 (-24...-23,2 – ускорение таяния льда)	184... 187	6,2–10,5	$\text{CaCl}_2\text{-NaCl-H}_2\text{O}$ $\text{CaCl-H}_2\text{O}$ $\text{NaCl-KCl-H}_2\text{O}$
Гюбнерит	≥245...278	-3,2...-3,1	–	–	5,1–5,3	–
Мусковит	≥167...202	-3,5	–	–	5,7	–

Примечание. T_e – температура гомогенизации, $T_{пл\ льда}$ – температура плавления льда, $T_{зет}$ – температура эвтектики, $T_{пл\ тв\ фаз}$ – температура плавления твердых фаз; прочерк – параметр не определен.

Note. T_e – homogenization temperature, $T_{пл\ льда}$ – ice melting temperature, $T_{зет}$ – eutectic temperature, $T_{пл\ тв\ фаз}$ – solid phase melting temperature; dash – parameter is not defined.

следовательно, главные солевые системы представлены: $\text{CaCl}_2\text{-MgCl}_2\text{-H}_2\text{O}$, $\text{CaCl}_2\text{-KCl-H}_2\text{O}$ и $\text{CaCl-H}_2\text{O}$. В некоторых включениях отмечается ускорение таяния льда в диапазоне температур $\sim 23,4\ldots 23$ °C, что может свидетельствовать о примесях $\text{NaCl-KCl-H}_2\text{O}$. Температуры плавления льда – $-4,2\ldots -10,6$ °C, соответственно, соленость менялась в диапазоне $\sim 6,7\ldots 14,6$ масс. % эквивалента хлорида натрия.

Гомогенизация включений из зерен флюорита происходила при относительно более

низких температурах $195\ldots 265$ °C (см. рис. 6). Растворение мелких твердых фаз наблюдалось при температурах $184\ldots 187$ °C. Температуры эвтектики близки с температурами ФВ из кварца $\sim 55\ldots 49$ °C с ускорением таяния льда при $\sim 24\ldots 23,2$ °C, соответственно, главные солевые системы те же: $\text{CaCl}_2\text{-NaCl-H}_2\text{O}$, $\text{CaCl-H}_2\text{O}$ и $\text{NaCl-KCl-H}_2\text{O}$.

Интервал температур гомогенизации ФВ из гюбнерита, определенный по некоторым включениям, более узок – $245\ldots 278$ °C (см. табл. 2). Из-за небольших размеров только в двух ФВ

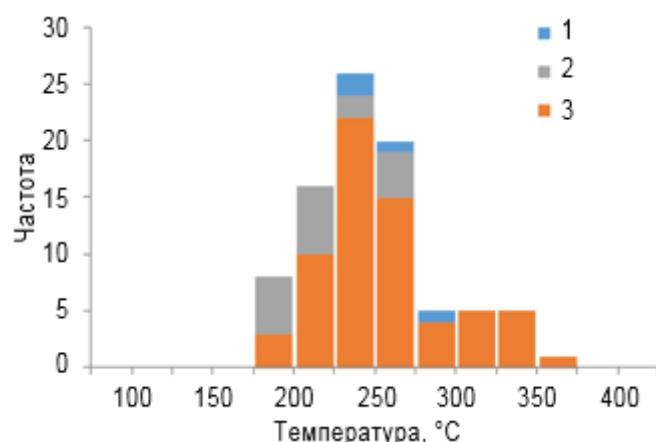


Рис. 6. Гистограмма распределения температур гомогенизации флюидных включений из рудных прожилков Инкурского месторождения:

1 – гюбнерит; 2 – флюорит; 3 – кварц

Fig. 6. Homogenization temperature distribution histogram for the fluid inclusions

(ore veinlets of the Inkur deposit):

1 – hubnerite; 2 – fluorite; 3 – quartz



удалось определить температуры плавления льда $\sim 3,2\ldots 3,1$ °С, что соответствует солености $\sim 5,1\ldots 5,3$ масс. % эквивалента хлорида натрия.

Кроме этого, в двух включениях из мусковита удалось определить температуры гомогенизации 167 и 202 °С, а также приблизительно оценить соленость $\sim 5,7$ масс. % эквивалента хлорида натрия. Мусковит – из центральной части прожилка, поэтому, скорее всего, является более поздним, чем более ранний мусковит из призальбандовых частей.

На рис. 6 показана гистограмма распределения температур гомогенизации ФВ из разных минералов. Температуры гомогенизации характеризуются бимодальным распределением. Выделяется преобладающая группа включений с максимумом определений в интервале 225–275 °С. Часть включений гомогенизируется при более высоких температурах, модальное значение температуры в этой группе ФВ соответствует интервалу 300–325 °С.

В составе газовой фазы включений из кварца рудных прожилков по данным КР-спектроскопии идентифицированы углекислый газ, в некоторых ФВ отмечается небольшой пик азота.

В единичных зернах кварца в пределах одной зоны роста зерна обнаружены очень мелкие ($\leq 2\text{--}4$ мкм) первичные сингенетические существенно-водные и существенно-газовые включения. В связи с очень мелкими размерами таких включений получить достоверные данные не удалось. Присутствие таких ФВ свидетельствует о редких периодах гетерогенизации (вспышки) рудообразующего раствора.

Обсуждение результатов

Гюбнерит, большая часть которого, судя по идиоморфизму, отложилась в начальный период минералообразующего процесса, является главным рудным минералом Инкурского месторождения. Однако кроме гюбнерита на месторождении присутствует достаточно большое количество рудных минералов. В общей сложности диагностировано более 20 минеральных видов. Впервые в рудах

установлен редкий необычный минерал из класса галогенидов – гидрофторид алюминия, по составу близкий розенбергиту. Исходя из химического состава минералов, слагающих рудные прожилки, можно качественно оценить элементный состав рудообразующих растворов. Главными жильными минералами являются кварц, флюорит, мусковит, что говорит о наличии в составе минералообразующих флюидов таких элементов, как кремний, калий, аллюминий, фтор, кальций. Состав ассоциаций рудных минералов (гюбнерит, сульфиды, сульфосоли и др.) свидетельствует о наличии в рудообразующих растворах таких элементов, как вольфрам, марганец, сера, железо, медь, свинец, цинк, висмут, бериллий, олово, серебро, теллур, молибден.

Таким образом, в составе минералообразующих гидротермальных растворов присутствует значительное количество рудных элементов, при этом в рудах количественно преобладает гюбнерит. Это может быть связано либо с высоким содержанием вольфрама относительно других элементов в растворах, либо со специфическими физико-химическими параметрами, благоприятными именно для отложения гюбнерита по сравнению с другими минералами, при близких концентрациях разных рудообразующих элементов в первичном растворе.

Результаты исследования ФВ показали, что минимальные температуры отложения кварца – $\sim 195\text{--}343$ °С, причем установлены две группы включений (см. рис. 6). Большинство определений попадают в низкотемпературный интервал 200–275 °С. В то же время в относительно высокотемпературной области на гистограмме распределения температур гомогенизации также фиксируется слабо проявленный максимум в интервале 300–325 °С. Такое распределение свидетельствует о наличии двух генераций ФВ, происхождение которых обусловлено, по-видимому, их захватом в ходе формирования разных генераций кварца – высокотемпературной и низкотемпературной. Температуры гомогенизации ФВ в гюбнерите варьируют в интервале $\sim 245\text{--}278$ °С и соответствуют низкотемпературной группе ФВ в кварце. В этот же относительно низкотемпературный интервал попадают ФВ



из флюорита – 195–265 °С, хотя большая часть определений попадает в интервал 195–225 °С. И наконец, минимальными температурами гомогенизации характеризуются ФВ из позднего мусковита (167–202 °С).

Такое распределение температур гомогенизации ФВ свидетельствует о существовании как минимум двух стадий минералообразования – высокотемпературной (более 300 °С), где отлагался ранний кварц, и относительно низкотемпературной (200–300 °С), где происходило отложение позднего кварца, гюбнерита и флюорита. Следовательно, отложение минералов в прожилках шло с понижением температуры. По данным В.Б. Наумова [26], большинство определений температур гомогенизации ФВ из вольфрамита и шеелита приходится на интервал 200–400 °С с максимумом в 200–300 °С. Большая часть определений солености растворов на месторождениях вольфрама приходится на значения менее 10 масс. % эквивалента хлорида натрия (~60 %).

Рудообразующие флюиды Инкурского месторождения характеризовались гомогенным агрегатным состоянием, умеренной концентрацией солей, присутствием в газовой фазе углекислого газа и азота, хлоридным составом (хлориды кальция, магния, калия, натрия), в то же время наличие фторсодержащих минералов свидетельствует о присутствии соединений фтора в составе флюида. Согласно исследованиям Ф.Г. Рейфа и Е.Д. Бажеева [19], месторождения Джидинского рудного поля сформированы существенно фторидными гидротермальными растворами.

Поскольку в рудах обнаружены единичные зерна кварца с сингенетическими существенно-водными и существенно-газовыми ФВ, предполагается, что в ходе рудоотложения были редкие периоды вскипания растворов. Кроме этого, большое количество газовых включений в гюбнерите говорит о том, что его отложение, скорее всего, происходило при участии газовой фазы.

Главными факторами осаждения гюбнерита из гидротермальных растворов являются изменение щелочности-кислотности, снижение температуры и солености. Однако в щелочной

гидротермальной среде его растворимость нечувствительна к температуре и солености раствора, тогда как снижение температуры способствует осаждению гюбнерита из кислых растворов [27, 28]. Высокое содержание мусковита в составе прожилков свидетельствует о повышенной кислотности растворов, формировавших прожилки Инкурского штокверка. По данным источника [28], в кислых растворах растворимость гюбнерита выше растворимости ферберита практически на порядок, что объясняет отложение вольфрама в форме гюбнерита. Следовательно, решающим фактором осаждения руд явилось падение температуры, обусловленное остыванием растворов.

Заключение

Главным рудным минералом штокверкового Инкурского месторождения является гюбнерит. В качестве второстепенных и редких присутствуют следующие минеральные виды: сульфиды (пирит, халькопирит, галенит, сфalerит, молибденит, ковеллин), сульфосоли (айкинит, тетраэдрит), теллуриды (гессит), оксиды (касситерит) и розенбергит(?). Главный жильный минерал представлен кварцем. В роли вторичных минералов присутствуют ковеллин и англезит. Установлена последовательность отложения минералов в рудных прожилках. Минералогические исследования позволили качественно оценить химический состав рудообразующих растворов, где присутствовали кремний, калий, аллюминий, фтор, кальций, вольфрам, марганец, сера, железо, медь, свинец, цинк, висмут, бериллий, олово, серебро, теллур, молибден.

Распределение температур гомогенизации предполагает наличие двух стадий минералообразования – высокотемпературной (≥ 300 °С), где отлагался ранний кварц, и низкотемпературной (≥ 200 –300 °С), где происходило отложение позднего кварца, гюбнерита и флюорита. Отложение минералов в прожилках шло с понижением температуры из относительно слабосоленых гомогенных растворов (с соленостью ~5,7–14,6 масс. % эквивалента хлорида натрия) с редкими периодами гетерогенизации. В газовой фазе включений идентифицированы углекислый газ и азот.



В солевом составе растворов присутствуют хлориды кальция с примесями хлоридов натрия, калия и магния. Наличие в рудах минералов, богатых фтором (флюорит, мусковит, топаз, розенбергит(?)), свидетельствует о

том, что в растворах кроме хлоридов присутствовали и фториды. Главным фактором осаждения гюбнерита из гидротермальных растворов является снижение температуры, обусловленное остыанием растворов.

Библиографический список

1. Damdinova L.B., Damdinov B.B., Huang X.-W., Bryansk N.V., Khubanov V.B., Yudin D.S. Age, conditions of formation, and fluid composition of the Pervomaiskoe molybdenum deposit (Dzhidinskoe ore field, South-Western Transbaikalia, Russia) // Minerals. 2019. Vol. 9. P. 572. <https://doi.org/10.3390/min9100572>
2. Игнатович В.И., Гусев Ю.П. Перспективы расширения минерально-сырьевой базы вольфрама // Разведка и охрана недр. 2007. № 12. С. 43–47.
3. Bodnar R.J., Vityk M.O. Interpretation of microthermometric data for H_2O -NaCl fluid inclusions // Fluid inclusions in minerals: methods and applications / eds. B. De Vivo, M.L. Frezzotti. Blacksburg: Virginia Tech, 1994. P. 117–130.
4. Борисенко А.С. Изучение солевого состава газово-жидких включений в минералах методом криометрии // Геология и геофизика. 1977. № 8. С. 16–27.
5. Бесова М.В. Геология и минералогия Джидинского вольфрамового месторождения // Месторождения редких и малых металлов СССР. Т. 1. М. – Л.: Издво АН СССР, 1939. С. 3–88.
6. Налетов П.И., Шалаев К.А., Деуля Т.Т. Геология Джидинского рудного района. Иркутск: Иркут. обл. изд., 1941. 282 с.
7. Смолянский Е.Н. Об основных закономерностях в пространственном размещении молибденовых и вольфрамовых месторождений в Джидинском рудном районе // Труды Восточно-Сибирского геологического института СО АН СССР. Серия геологическая. 1960. Вып. 1. С. 20–38.
8. Игнатович В.И. Дайки и молибден-вольфрамовая минерализация Первомайской интрузии гранит-порфиров (Джидинское месторождение). Улан-Удэ: Бурят. кн. изд-во, 1959.
9. Игнатович В.И. О структуре Джидинского рудного поля // Материалы по геологии и полезным ископаемым БурАССР. Вып. 6. Улан-Удэ: Бурят. кн. изд-во, 1961. С. 3–22.
10. Малиновский Е.П. Определение пространственного положения источников рудообразующих флюидов Джидинских месторождений по данным структурного анализа // Джидинский рудный район (проблемы развития и освоения минеральных ресурсов): сб. стат. / под ред. М. Мохосоева. Новосибирск: Наука, 1984. С. 116–126.
11. Онтоев Д.О. Стадийность минерализации и зональность месторождений Забайкалья. М.: Наука, 1974. 244 с.
12. Онтоев Д.О. Стадийность минерализации и зональность молибдено-вольфрамовых месторождений Джидинского рудного района // Джидинский рудный район. Новосибирск: Наука, 1984. С. 53–76.
13. Батурина Е.Е., Рипп Г.С. Молибденовые и вольфрамовые месторождения Западного Забайкалья (основные черты металлогенеза и геохимии). М.: Наука, 1984. 152 с.
14. Гордиенко И.В., Филимонов А.В., Минина О.Р., Горнова М.А., Медведев А.Я., Климук В.С. [и др.]. Джидинская островодужная система Палеоазиатского океана: строение и основные этапы геодинамической эволюции в венде-палеозое // Геология и геофизика. 2007. Т. 48. № 1. С. 120–140.
15. Дистанова А.Н. Позднепалеозойские гранитовые интрузии западной части Джидинской зоны (Западное Забайкалье) // Гранитоидные комплексы Сибири / отв. ред. Ю.А. Кузнецова. Вып. 440. Новосибирск: Наука, 1979. С. 3–23.
16. Ходанович П.Ю., Смирнова О.К. Вольфрамоносные березиты и локальный прогноз оруденения. Новосибирск: Наука, 1991. 208 с.
17. Ходанович П.Ю. Молибдено-вольфрамовые месторождения Джидинского рудного поля // Месторождения Забайкалья. Т. 1. Кн. 1. Чита – М.: Геоинформмарк, 1995. С. 149–163.
18. Чернышев И.В., Гольцман Ю.В., Баирова Э.Д., Иванова Г.Ф. Rb-Sr-геохронометрия процессов последовательного формирования гранитов, грейзенизации и гидротермальной минерализации: Джидинское W-Mo месторождение, Западное Забайкалье // Доклады Академии наук. 1998. Т. 360. № 4. С. 537–540.
19. Рейф Ф.Г., Бажеев Е.Д. Магматический процесс и вольфрамовое оруденение. Новосибирск: Наука, 1982. 158 с.
20. Рейф Ф.Г. Условия и механизмы формирования гранитных рудно-магматических систем (по термобаро-геохимическим данным). М.: Изд-во ИМГРЭ, 2009. 498 с.
21. Повилайтис М.М. Основные черты минералогии Джидинского молибден-вольфрамового месторождения. М.: Изд-во АН СССР, 1960. 165 с.
22. Повилайтис М.М., Мозгова Н.Н., Сендерова В.М. Минералы висмута в Джидинском молибдено-вольфрамовом месторождении (Западное Забайкалье) // Записки Всесоюзного минералогического общества. 1969. Ч. 98. Вып. 6. С. 655–664.
23. Стельмачонок К.З. О синхронности образования рудовмещающих трещин и формирования молибденовой минерализации на Первомайском штокверковом месторождении (Забайкалье) и причинах трещинно-образования // Доклады Академии наук. 1994. Т. 337. № 3. С. 382–385.
24. Стельмачонок К.З. О близодновременном формировании односистемных прожилков в молибденистом штокверковом рудном теле Джидинского



месторождения (Забайкалье) // Доклады Академии наук. 1995. Т. 341. № 3. С. 399–402.

25. Шадлун Т.Н., Онтоев Д.О., Басова Г.В., Вяльсов Л.Н., Муравьева И.В. Сульфосмутит меди и серебра из Джидинского месторождения // Записки Всесоюзного минералогического общества. 1969. Ч. 98. Вып. 4. С. 452–463.

26. Наумов В.Б., Дорофеева В.А., Миронова О.Ф. Физико-химические параметры формирования гидротермальных месторождений по данным исследований флюидных включений. I. Месторождения олова и вольфрама // Геохимия. 2011. № 10. С. 1063–1082.

27. Li J., Liu Y., Zhao Z., Chou I.M. Roles of carbonate / CO₂ in the formation of quartz-vein wolframite deposits: insight from the crystallization experiments of huebnerite in alkali-carbonate aqueous solutions in a hydrothermal diamond-anvil cell // Ore Geology Reviews. 2018. Vol. 95. P. 40–48. <https://doi.org/10.1016/j.oregeorev.2018.02.024>

28. Liu X., Xiao C. Wolframite solubility and precipitation in hydrothermal fluids: insight from thermodynamic modeling // Ore Geology Reviews. 2020. Vol. 117. P. 103289. <https://doi.org/10.1016/j.oregeorev.2019.103289>

References

1. Damdinova LB, Damdinov BB, Huang XW, Bryan-sky NV, Khubanov VB, Yudin DS. Age, conditions of formation, and fluid composition of the Pervomaiskoe molybdenum deposit (Dzhidinskoe ore field, South-Western Transbaikalia, Russia). *Minerals*. 2019;9:572. <https://doi.org/10.3390/min9100572>
2. Ignatovich VI, Gusev YuP. Prospects for the expansion of the tungsten mineral resource base. *Razvedka i okhrana nedr = Prospect and Protection of Mineral Resources*. 2007;12:43–47. (In Russ.)
3. Bodnar RJ, Vityk MO. Interpretation of microthermometric data for H₂O-NaCl fluid inclusions. In: De Vivo B, Frezzotti ML (eds.). *Fluid inclusions in minerals: methods and applications*. Blacksburg: Virginia Tech; 1994. p.117–130.
4. Borisenko AS. Study of the salt composition of gas-liquid inclusions in minerals by the method of cryometry. *Geologiya i geofizika*. 1977;8:16–27. (In Russ.)
5. Besova MV. Geology and mineralogy of the Dzhidinsky tungsten deposit. In: *Mestorozhdeniya redkikh i malykh metallov SSSR = Deposits of rare and minor metals in the USSR*. Vol. 1. Moscow – Leningrad: The USSR Academy of Sciences; 1939. p.3–88. (In Russ.)
6. Naletov PI, Shalaev KA, Deulya TT. *Geology of the Dzhidinsky ore district*. Irkutsk: Irkutskoe oblastnoe izdatel'stvo; 1941. 282 p. (In Russ.)
7. Smolyanski EN. On the basic regularities in the spatial distribution of molybdenum and tungsten deposits in the Dzhidinsky ore district. *Trudy Vostochno-Sibirskogo geologicheskogo instituta SO AN SSSR. Seriya geologicheskaya*. 1960;1:20–38. (In Russ.)
8. Ignatovich VI. *Dykes and molybdenum-tungsten mineralization of the Pervomaisk intrusion of granite-porphyry (the Dzhidinsky deposit)*. Ulan-Ude: Buryatskoe knizhnoe izdatel'stvo; 1959. (In Russ.)
9. Ignatovich VI. On the structure of the Dzhidinsky ore field. In: *Materialy po geologii i po-leznyim iskopаемым BuriASSR = Materials on geology and minerals of Buryat ASSR*. Iss. 6. Ulan-Ude: Buryatskoe knizhnoe izdatel'stvo; 1961. p.3–22. (In Russ.)
10. Malinovskii EP. Defining the spatial location of the ore-forming sources of the Dzhidinsky deposits by the structural analysis data. In: Mokhosoev M (eds.). *Dzhidinskii rudnyi raion = Dzhidinsky ore district*. Novosibirsk: Nauka; 1984. p.116–126.
11. Ontoev DO. *Staged mineralization and zoning of Transbaikalia deposits*. Moscow: Nauka; 1974. 244 p. (In Russ.)
12. Ontoev DO. Staged mineralization and zoning of molybdenum-tungsten deposits of the Dzhidinsky ore district. In: *Dzhidinskii rudnyi raion = Dzhidinsky ore district*. Novosibirsk: Nauka; 1984. p.53–76. (In Russ.)
13. Baturina EE, Ripp GS. *Molybdenum and tungsten deposits of Western Transbaikalia (the main metallogenic and geochemical features)*. Moscow: Nauka; 1984. 152 p. (In Russ.)
14. Gordienko IV, Filimonov AV, Minina OR, Gornova MA, Medvedev AYa, Klimuk BC., et al. Dzhidinsky island-arc system of the Paleo-Asian Ocean: structure and main stages of the geodynamic evolution in the Vendian-Paleozoic. *Geologiya i geofizika*. 2007;48(1):120–140. (In Russ.)
15. Distanova AN. Late Paleozoic granite intrusions of the western part of the Dzhidinsky zone (Western Transbaikalia). In: Kuznetsov YuA (eds.). *Granitoidnye kompleksy Sibiri = Granitoid complexes of Siberia*. Iss. 440. Novosibirsk: Nauka; 1979. p.3–23. (In Russ.)
16. Khodanovich PYu, Smirnova OK. *Tungsten-bearing beresite rocks and local mineralization prognosis*. Novosibirsk: Nauka; 1991. 208 p. (In Russ.)
17. Khodanovich PYu. Molybdenum-tungsten deposits of the Dzhidinsky ore field. In: *Mestorozhdeniya Zabaikal'ya = Deposits of Transbaikalia*. Vol. 1. Book 1. Chita – Moscow: Geoinformmark; 1995. p.149–163. (In Russ.)
18. Chernyshev IV, Gol'stman YuV, Bairova ED, Ivanova GF. Rb-Sr-geochronometry of the processes of granites sequential formation, greisenization and hydrothermal mineralization: Dzhidinsky W-Mo deposit, Western Transbaikalia. *Doklady Akademii nauk*. 1998;360(4):537–540. (In Russ.)
19. Reyf FG, Bazheev ED. *Magmatic process and tungsten mineralization*. Novosibirsk: Nauka; 1982. 158 p. (In Russ.)
20. Reyf FG. *Conditions and mechanisms of formation of granite ore-magmatic systems (by the data of fluid inclusions studies)*. Moscow: Institute of Mineralogy, Geochemistry, and Crystal Chemistry of Rare Elements; 2009. 498 p. (In Russ.)
21. Povilaitis MM. *The main mineralogical features of the Dzhidinsky molybdenum-tungsten deposit*. Moscow: The USSR Academy of Sciences; 1960. 165 p. (In Russ.)



22. Povilaitis MM, Mozgova NN, Senderova VM. Bismuth minerals in the Dgidinsky molybdenum-tungsten deposit (West Transbaikal). *Zapiski Vsesoyuznogo mineralogicheskogo obshchestva*. 1969;98(6):655–664. (In Russ.)
23. Stel'machonok KZ. On the synchronization of the formation of the ore-bearing fractures and the molybdenum mineralization at the Pervomaisk stockwork deposit (Transbaikalia), and the causes of the fractures formation. *Doklady Akademii nauk*. 1994;337(3):382–385. (In Russ.)
24. Stel'machonok KZ. On the near-simultaneous formation of the single-system veins in the molybdenite stockwork ore body (the Dzhidinsky deposit, Transbaikalia). *Doklady Akademii nauk*. 1995;341(3):399–402. (In Russ.)
25. Shadlun TN, Ontoev DO, Basova GV, Vjalsov LN, Muravjeva IV. Copper and silver sulfobismuthite from the Dgidinsky deposit. *Zapiski Vsesoyuznogo mineralogicheskogo obshchestva*. 1969;98(4):452–463. (In Russ.)
26. Naumov VB, Dorofeev VA, Mironova OF. Physical-chemical parameters of the hydrothermal deposits formation according to the studies of fluid inclusions. 1. Deposits of tin and tungsten. *Geokhimiya*. 2011;10:1063–1082. (In Russ.)
27. Li J, Liu Y, Zhao Z, Chou IM. Roles of carbonate / CO₂ in the formation of quartz-vein wolframite deposits: insight from the crystallization experiments of huebnerite in alkali-carbonate aqueous solutions in a hydrothermal diamond-anvil cell. *Ore Geology Reviews*. 2018;95:40–48. <https://doi.org/10.1016/j.oregeorev.2018.02.024>
28. Liu X, Xiao C. Wolframite solubility and precipitation in hydrothermal fluids: insight from thermodynamic modeling. *Ore Geology Reviews*. 2020;117:103289. <https://doi.org/10.1016/j.oregeorev.2019.103289>

Критерии авторства / Authorship criteria

Дамдинова Л.Б., Дамдинов Б.Б. написали статью, имеют равные авторские права и несут одинаковую ответственность за plagiat.

Lyudmila B. Damdinova, Bulat B. Damdinov are the authors of the article, hold equal copyright and bear equal responsibility for plagiarism.

Конфликт интересов / Responsibility for plagiarism

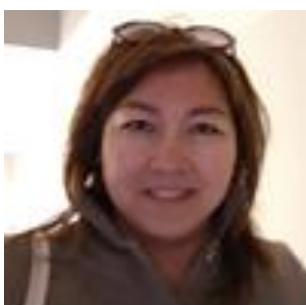
Авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов.

The authors declare that there is no conflict of interest regarding the publication of this article.

Все авторы прочитали и одобрили окончательный вариант рукописи.

All authors have read and approved the final version of this manuscript.

Сведения об авторах / Information about the authors



Дамдинова Людмила Борисовна,
кандидат геолого-минералогических наук,
старший научный сотрудник Лаборатории петрологии,
Геологический институт СО РАН,
670047, г. Улан-Удэ, ул. Сахьяновой, 6а, Россия,
✉ e-mail: iudamdinova@mail.ru

Lyudmila B. Damdinova,
Cand. Sci. (Geol. & Mineral.),
Senior Researcher, Petrology Laboratory,
Geological Institute, Siberian Branch of the Russian Academy of Sciences,
6a Sakhynova St., Ulan-Ude 670047, Russia,
✉ e-mail: iudamdinova@mail.ru



Дамдинов Булат Батуевич,
доктор геолого-минералогических наук,
заместитель директора по научной работе,
Геологический институт СО РАН,
670047, г. Улан-Удэ, ул. Сахьяновой, 6а, Россия,
e-mail: damdinov@mail.ru

Bulat B. Damdinov,
Dr. Sci. (Geol. & Mineral.),
Deputy Director for Research,
Geological Institute, Siberian Branch of the Russian Academy of Sciences,
6a Sakhyanovoi St., Ulan-Ude 670047, Russia,
e-mail: damdinov@mail.ru



Оригинальная статья / Original article

УДК 550.36

DOI: <http://dx.doi.org/10.21285/2686-9993-2020-43-3-307-324>



Discussion on the Cenozoic tectonic evolution and dynamics of southern Tibet*

© Demin Liu^a, Weiran Yang^b, Tieying Guo^c, Jiangtao Ru^d, Aimin Xiong^e

^{a,d,e}China University of Geosciences (Wuhan), Wuhan, China

^{b,c}China University of Geosciences (Beijing), Beijing, China

Abstract: Opening-closing tectonics is a new idea for exploring the global tectonics, which holds that every tectonic movement of all materials and geological bodies on earth is characterized by opening and closing. The opening-closing tectonic view can be used to explain some geological phenomena developing in continents which cannot be reasonably explained by the theory of plate tectonics. Based on the available basic geological data and combining with the opening-closing view, we analyzed the divisions and characteristics of tectonic units in South Tibet, and propose that Tibet can be divided into gravitational detachment and detachment fault zones, which are superimposed thrust fault zones and reconstructed normal fault zones, respectively. Although the mainstream opinion believed that the Tibetan Plateau is formed by collision-compression orogenesis, field investigation revealed the existence of the Rongbu Temple normal fault in the 1970s. We consider that the Rongbu Temple normal fault and the Main Central Thrust were formed earlier than the South Tibet detachment fault, and the former two faults constitute the two boundaries of the southern Tibet extrusion structure. The South Tibet detachment fault partially superimposes on the Main Central Thrust and manifests a relatively high angle in following the Rongbu Temple normal fault north of the Chomolangma. We suggest that the three fault systems are the products of different periods and tectonic backgrounds. The tectonic units, such as klippe and windows identified by previous researchers in southern Tibet, belong to thrust fault system but usually have no obvious extrusion or thrust characteristics; however, they are characterized by missing strata columns as younger strata overlapping the older ones. These klippe and windows should be the results of later gravitational decollement and must be characterized as extensions and slips, respectively. Based on opening-closing theory, we suggest that since the Cenozoic the study area had undergone multi-stage development, which can be divided into the oceanic crust expansion (opening) and subduction (closing) and the continental collision (closing) and intracontinental extension (opening) stages. Geothermal energy from the deep earth, gravitational potential energy from the earth's interior, and additional stress energy from tectonic movements, all played a key role in the multistage tectonic evolutionary process.

Keywords: South Tibet, geological structure, Cenozoic tectonic evolution, opening-closing tectonics

Acknowledgements: We wish to thank professors Mao Xiaoping and Zhang Zeming for inspiring discussions and much help during the writing of this article. And thanks to the reviewers for their valuable comments essential for further improving the quality of the manuscript.

Information about the article: received July 01, 2020; revised August 03, 2020; accepted September 01, 2020.

For citation: Liu Demin, Yang Weiran, Guo Tieying, Ru Jiangtao, Xiong Aimin. Discussion on the Cenozoic tectonic evolution and dynamics of southern Tibet. *Nauki o Zemle i nedropol'zovaniye = Earth sciences and subsoil use*. 2020;43(3):307–324. (In Russ.) <https://doi.org/10.21285/2686-9993-2020-43-3-307-324>

Обсуждение кайнозойской тектонической эволюции и динамики Южного Тибета*

© Дэминь Лю^a, Вэйжань Ян^b, Тайн Го^c, Цзянтао Жу^d, Айминь Сюн^e

^{a,d,e}Китайский геологический университет (Ухань), г. Ухань, Китай

^{b,c}Китайский геологический университет (Пекин), г. Пекин, Китай

Резюме: Новой идеей в исследовании глобальных тектонических движений является концепция тектоники открытия-закрытия, которая утверждает, что каждое тектоническое явление, преобразование вещества и формирование геологических тел на Земле – это результат чередующихся движений открытия и закрытия. Тектонический взгляд

* The article was provided by the Earth Science Frontiers journal within the framework of the agreement between the editorial boards of Irkutsk National Research Technical University (Irkutsk, Russia) and China University of Geosciences (Beijing, China) on the exchange of open access scientific papers.

* Статья была предоставлена редакцией журнала Earth Science Frontiers в рамках соглашения между редакциями Иркутского национального исследовательского технического университета (г. Иркутск, Россия) и Китайского геологического университета (г. Пекин, Китай) об обмене научными статьями открытого доступа.



на открытие-закрытие может быть использован для объяснения некоторых геологических явлений, развивающихся на континентах, которые не могут быть однозначно объяснены теорией тектоники плит. Основываясь на доступных геологических данных и опираясь на концепцию открытия-закрытия, авторы проанализировали стратиграфические подразделения и тектонические единицы Южного Тибета и предложили разделить эту территорию на разломные зоны гравитационного отрыва и разломные зоны тектонического отрыва, которые накладываются друг на друга. Несмотря на широко распространенное мнение о том, что Тибетское нагорье образовано орогенезом столкновения-сжатия, полевые исследования выявили существование нормального сброса храма Жунбу в 1970-х гг. Мы считаем, что нормальный сброс храма Жунбу и Главный центральный надвиг были сформированы раньше, чем разлом Южного Тибета, а первые два разлома представляют собой две границы экструзионной структуры Южного Тибета. Разлом Южного Тибета частично накладывается на Главный центральный надвиг и, имея относительно большой угол, следует за нормальным сбросом храма Жунбу к северу от Джомолунгмы. Мы предполагаем, что три системы разломов являются продуктами разных периодов и разных тектонических процессов. Тектонические единицы, такие как клипы и окна, идентифицированные предыдущими исследователями в Южном Тибете, принадлежат к системе надвигов, но обычно не имеют явных характеристик сжатия и надвигания, в то же время они характеризуются отсутствием стратификации пластов, поскольку более молодые пласти перекрывают более старые. Эти клипы и окна, скорее всего, являются результатом более позднего гравитационного наложения и должны быть охарактеризованы как удлинение и проскальзывание соответственно. Основываясь на теории открытия-закрытия, мы предполагаем, что начиная с кайнозоя исследуемая область претерпела многоэтапное развитие, которое можно разделить на последовательное расширение (раскрытие) и субдукцию (закрытие) океанической коры, а также следующие за ними этапы континентальной коллизии (закрытие) и внутренконтинентального расширения (раскрытие). Геотермальная энергия и гравитационная потенциальная энергия из недр Земли, а также дополнительная энергия напряжения от тектонических движений – все это сыграло ключевую роль в многоступенчатом тектоническом эволюционном процессе.

Ключевые слова: Южный Тибет, геологические структуры, кайнозойская тектоническая эволюция, тектоника открытия-закрытия

Благодарности: Авторы благодарят профессоров Мао Сяопин и Чжан Цзэмин за вдохновляющие обсуждения и большую помощь при написании этой статьи. Авторы также благодарны рецензентам за ценные комментарии, способствовавшие улучшению качества рукописи.

Информация о статье: поступила в редакцию 01 июля 2020 г.; поступила после рецензирования и доработки 03 августа 2020 г.; принятая к публикации 01 сентября 2020 г.

Для цитирования: Лю Дэминь, Ян Вэйжань, Го Тайн, Жу Цзянтао, Сюн Айминь. Обсуждение кайнозойской тектонической эволюции и динамики Южного Тибета. *Науки о Земле и недропользование*. 2020. Т. 43. № 3. С. 307–324. <https://doi.org/10.21285/2686-9993-2020-43-3-307-324>

Background

The "opening-closing tectonics" hypothesis is pioneered jointly by academicians Huang Jiqing, Zhang Wenyu and Ma Xingyuan and other young scholars in the 1970s [1, 2]. Before that, the plate tectonics theory, based on marine geological survey data, had proposed a geological tectonic evolutionary model which advanced geology into a new era of lithosphere dynamics research. However, the overly idealized plate motion model encountered a series of problems in the study of continental geology. Experimental studies have proven that the continental lithosphere is not a simple rigid plate and the detachment and relative movements between various interlayers of the continental lithosphere are very common and strong. The asthenosphere that the continental lithosphere drifts on is also uneven. Expansion between continental blocks does not always form oceans but "limited ocean basins". The cracking and aggregation of continental

blocks in the geologic periods are multi-cycled, and there are also many types of orogeny movements inside the continents. Natural phenomena such as these cannot be explained by plate tectonics. The opening-closing tectonics, on the other hand, is a link connecting various earth movements and all geological disciplines, therefore, it can better explain some of these intracontinental tectonic phenomena.

The view of opening-closing tectonics emphasizes that the basic form of all earth's materials and movements is opening and closing. The opening and closing movements can be seen as approaching (opposite movement) and separation (reverse movement) in the horizontal direction, while contracting (centripetal movement) and expansion (centrifugal movement) in the vertical direction. The two are unified, that is, the opening movement (expansion) on the vertical is contemporaneous with opening (separation) on the horizontal, and the closing movement



(contraction) on the vertical corresponds to closing (approaching) on the horizontal; at the same time, the vertical (centrifugal) movement is strongly open (separation) in the horizontal direction, and vice versa. In this way, the opening and closing tectonics view unifies the vertical and horizontal movements as well as the deep and shallow structures of the earth into an organic whole. Opening and closing exist in a unified geological body. The two are interdependent, opposite and interconvertible. The spatiotemporal position of the transition point (area) of opening and closing movements has both theoretical and practical significance. The most intensive material exchange, tectonic movement, and magmatic activity occur at the transition point (area) where most orogenic belts concentrates. Meanwhile, the transition point (area) possesses the most abundance of various mineral resources and also frequent geological disasters such as earthquakes, volcanoes, mudslides and landslides.

In this paper, we compare the previously determined geological structure of the Chomolangma region in southern Tibet with traditional integrated geological maps based on the opening-closing tectonic view. We concur that although the interpretation of several basic geological phenomena in the Himalayan orogenic belt in southern Tibet is still controversial, opening-closing tectonics can reasonably explain the Cenozoic tectonic evolution process in this region. We hope this paper will draw attention of other researchers to opening-closing tectonics and offer their valuable thoughts on this subject.

Division of tectonic units in southern Tibet

The southern part of the Qinghai-Xizang Plateau is generally composed of extensional detachment and compressional nappe structural zones, where a series of parallel thrust fault zones developed. Lying from north to south are the Gangdese magmatic arc zone (GDS), the Tethys Himalayan tectonic zone (THM), the Great Himalayan tectonic zone (GHM), the Lesser Himalayan tectonic zone (LHM), and the sub-Himalaya tectonic

zone (SHM) (Siwalik Foreland Basin Sedimentary Belt). The respective boundaries between them are the India-Yarlung-Tsangpo suture zone (IYSZ), the South Tibet detachment system (STDS), the Main Central Thrust (MCT), the Main Boundary Thrust (MBT), and the Main Frontal Thrust (MFT) (Fig. 1)^{1,2}. Based on previous studies, and using the opening-closing tectonic view in combination with the dynamic tectonic unit divisional method, we summarize in this paper the geological structures, characteristics of tectonic units, and tectonic boundary attributes of the southern Tibetan Plateau.

The Main Central Thrust (MCT) was first proposed by Heim and Gansse [3] who believed that folding develops extensively on the MCT, and a set of older metamorphic rocks reverse gently overlapping the steeply dipping younger limestone. Although the MCT integrally serves as the boundary between GHM and LHM, some GHM rock formation units surrounded by the MCT are within the LHM (Figs. 2 and 3). As Harrison et al. [4] pointed out that not all shear planes are simultaneously active in shear zones. Therefore, the MCT position, as the main convergence point, has also changed over time in shear zones.

Arita [7] found abrupt changes in lithology and metamorphic grades in the MCT shear zone under a Leforte designated MCT fault [8]. Therefore, Arita named the MCT fault as MCT-I (or lower MCT) and the Leforte designated MCT fault as MCT-II (upper MCT) [8]. Consequently, later scholars often draw two MCTs in the geological map of the plateau (Fig. 4). There are three general views on the MCT: first, it has some branching characteristics, i.e., the main fault plane is straight with high-angle dipping but branching faults are undulating (Fig. 2); second, it has undulating characteristics as a whole (Fig. 3); and third, it can be divided into two faults developed in different periods (Fig. 4).

The South Tibet Detachment System (STDS), located between the Tethys Himalayan and High Himalayan tectonic zones, has been well defined by geological scholars [10, 11] and widely studied. It runs parallel to the Himalayan range for more

¹ Pan G.T., Ding J., Yao D.S. Geological map of the Qinghai-Xizang (Tibet) Plateau and adjacent areas. Chengdu: Chengdu Cartographic Publishing House, 2004.

² Ren J.S., Niu B.G., Wang J., et al. 1:5 million international geological map of Asia. Beijing: Geology Publishing House, 2013.

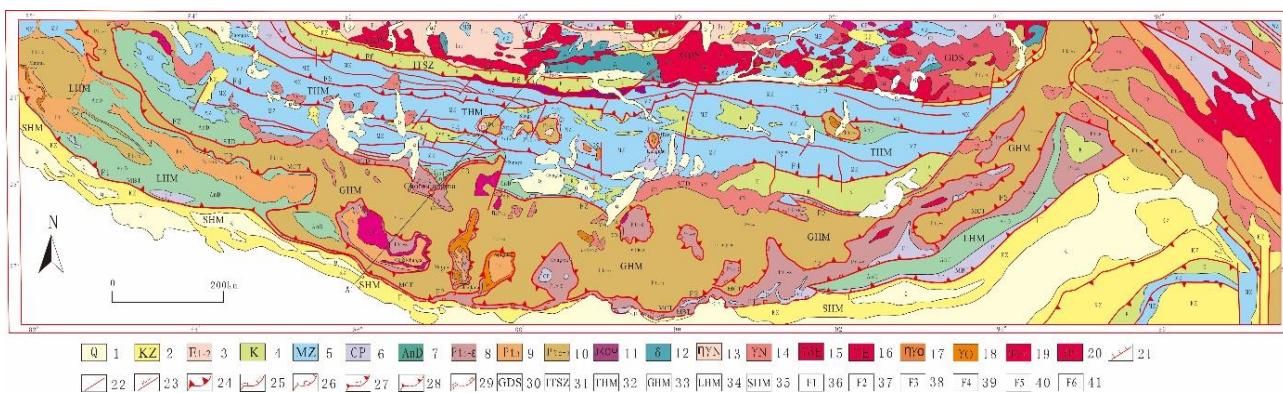


Рис. 1. Тектоническая схематическая карта Южного Тибета (с изменениями)^{3,4}:

1 – голоцен; 2 – кайнозой; 3 – палеоцен; 4 – мел; 5 – мезозой; 6 – каменноугольно-пермский период (покров 3);
 7 – ранний девон (покров 2); 8 – поздний протерозой – кембрий (покров 1); 9 – поздний протерозой (покров 1);
 10 – средний протерозой (фундамент); 11 – оphiолитовый меланж; 12 – диорит; 13 – неогеновый
 полевошпатовый гранит; 14 – неогеновый гранит; 15 – палеогеновый гранодиорит; 16 – палеогеновый
 гранит; 17 – ордовикский полевой шпат; 18 – ордовикский гранит; 19 – неопротерозойский гранит;
 20 – протерозойский гранит; 21 – сброс; 22 – неидентифицированный разлом; 23 – сдвиг; 24 – надвиг;
 25 – детачмент; 26 – нормальный сброс, наложенный и реконструированный по разлому детачмента;
 27 – надвиг, наложенный и реконструированный; 28 – скрытый надвиг; 29 – скрытый детачмент;
 30 – тектоническая зона Гандисе; 31 – сутурная зона Ярлунг-Цангпо; 32 – Гималайская тектоническая
 зона Тениса; 33 – Великая гималайская тектоническая зона; 34 – тектоническая зона Малых Гималаев;
 35 – Субгималайская тектоническая зона; 36 – Главный пограничный надвиг; 37 – Главный центральный
 надвиг; 38 – Южно-Тибетская система детачмента; 39 – надвиг Тингри-Гамба;
 40 – надвиг Дзанда-Цюндоцзян; 41 – надвиг реки Южная Ярлунг-Цангпо

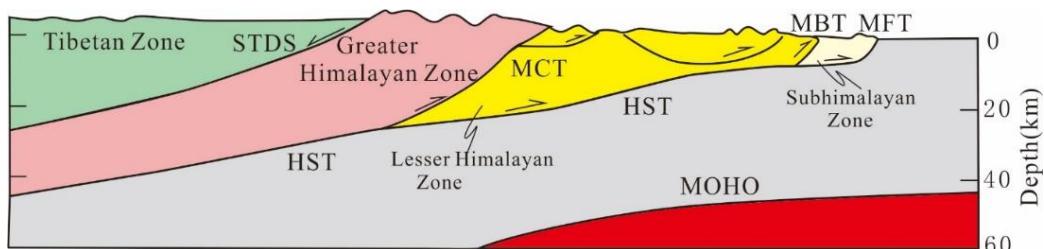


Fig. 2. Generalized cross section of the Himalayan margin of the Tibetan Plateau (adapted from [5]):

HST – Himalayan Sole Thrust; MCT – Main Central Thrust; MBT – Main Boundary Thrust;
 MFT – Main Frontal Thrust; STDS – South Tibet detachment system

Рис. 2. Обобщенный разрез гималайской окраины Тибетского плато (по материалам источника [5]):
 HST – надвиг подошвы Гималаев; MCT – Главный центральный надвиг; MBT – Главный пограничный надвиг;
 MFT – Главный фронтальный надвиг; STDS – южно-тибетская система детачмента

³ Pan G.T., Ding J., Yao D.S. Geological map of the Qinghai-Xizang (Tibet) Plateau and adjacent areas. Chengdu: Chengdu Cartographic Publishing House, 2004.

⁴ Ren J.S., Niu B.G., Wang J., et al. 1:5 million international geological map of Asia. Beijing: Geology Publishing House, 2013.

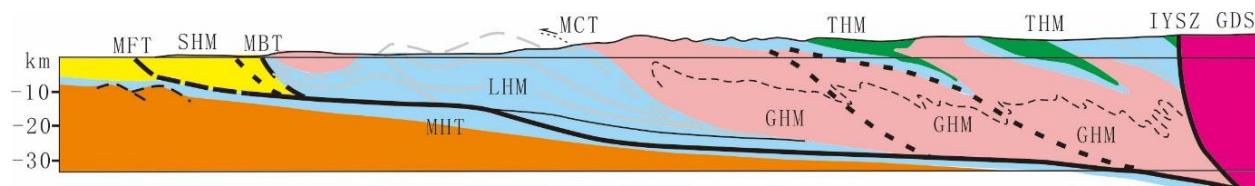


Fig. 3. Cross section of the Himalayan orogen (adapted from [6]):
 MHT, MCT, MBT and MFT – see Fig. 2; IYSZ – India-Yarlung-Tsangpo suture zone;
 GDS – Gangdise tectonic belt

Рис. 3. Разрез гималайского орогена (по материалам источника [6]):
 МHT, МСТ, МВТ и МFT – см. рис. 2; IYSZ – сутурная зона Индия-Ярлунг-Цангпо;
 GDS – тектонический пояс Гандисе

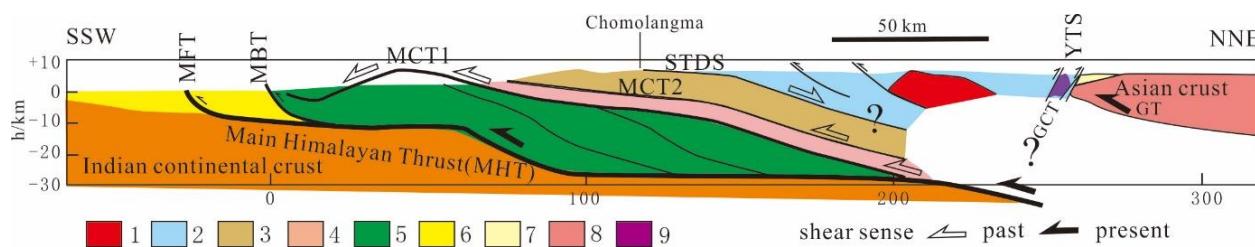


Fig. 4. Tectonic evolutionary pattern of South Tibet (adapted from [9]):
 1 – North Himalayan domes; 2 – Tethys sedimentary rock series; 3 – Upper Himalayan crystalline sequence;
 4 – Lower Himalayan crystalline sequence; 5 – Lesser Himalayan structural belt;
 6 – Siwalik sedimentary rock series; 7 – Miocene molasse; 8 – Gangdese batholith; 9 – Ophiolites
 YTS – Yarlung-Tsangpo suture zone; GCT – Great Counter Thrust

Рис. 4. Тектоническая модель эволюции Южного Тибета (по материалам источника [9]):
 1 – Северные Гималаи; 2 – серии осадочных пород Тетиса; 3 – кристаллическая толща Верхних Гималаев;
 4 – кристаллическая толща Нижних Гималаев; 5 – структурный пояс Малых Гималаев;
 6 – осадочные породы серии сивалик; 7 – миоценовая моласса; 8 – ганддезийский батолит; 9 – офиолиты
 YTS – сутурная зона Ярлунг-Цангпо; GCT – Надвиг Большого контура

than 2000 km. The STDS is several kilometers wide and consists of some near-parallel brittle faults or ductile shear zones with complex movement patterns, such as alternate northward and southward movements [12–15]. The earlier studies have suggested that the STDS is nearly parallel to the MCT and develops between the High Himalayan range and the Laguigangri thermo-uplifting extensional zone. We believe the STDS detaches along the unconformity between the basement and the caprock and is surrounded by slip surfaces on both the south and north sides of the Chomolongma. The STDS develops not only between the high Himalayan tectonic belt and the Laguigangri thermo-uplifting extensional zone, but also in the low Himalayan tectonic belt on the south side of the Everest, and generally distributes between the MCT and the normal fault on the north side of the Laguigangri thermo-uplifting extensional zone. Due to undulation on the horizontal plane and denudation of some sections, the footwall of the basement-detachment fault can be seen from the surface.

The Main Boundary Thrust (MBT), also proposed by Heim and Gansser [3], is defined as a thrust fault that pushes the Lesser Himalayan over the sub-Himalayan Cenozoic sedimentary sequences (Figs. 2, 3 and 4). The inferred age of the MBT in the central Himalayas starts at 11 Ma based on sedimentary rate change [16], and it is still considered active after 5 Ma evidenced by the coarse-grained clastic deposits added to the Himalayan foreland basin on the MBT's hanging wall [17]. It can be seen in Fig. 1 that the partial Cenozoic stratum exposes above the MBT with the MBT and MCT largely coincident in the middle section. One may consider that the MBT established previously is not continuous distributed in the EW direction, and the so-called MBT may be other faults.

The Main Frontal Thrust (MFT) was considered by Gansser as the thrust fault developing between the Neogene Siwalik Group and Quaternary sediments of the Indo-Ganghe Basin [18]. Figure 1, however, shows no strict boundary between the two sediments, so we believe the MFT



cannot be seen but a hidden fault in most areas. The MFT fault in Nepal causes overlaying of the two sediments, a sign of the fault's intensive activity in the Holocene [19].

The Main Himalayan Thrust (MHT) is not visible in the shallow crust, and scholars regarded it as a fault in the deep crust, formed by merging the three thrust faults (MCT, MBT, MFT) in South Tibet. Schelling and Arita [20] unified these three major Himalayan faults in eastern Nepal, South Himalaya into a low-angle fault and named it the Main Detachment Fault (MDT). But, the later results of the INDEPTH seismic reflection profiling in Southern Tibet showed that the tectonic surface lies deep in the crust of the North Himalayan tectonic zone [21]. Therefore, it is believed that the MHT only exists deep in the earth's crust, but it should still be represented by the three parallel thrust faults on the Earth's surface (Figs. 3 and 4).

Discussion of several basic geological problems in southern Tibet

Southern Tibet has relatively harsh natural conditions and quite complicated geological structure. Although a large number of experts and scholars have done research in the area, many controversial issues remain. In this paper, we shall discuss the following representative issues.

Klippe, sliding peak and the MCT in southern Tibet. Around the Himalayan arc top on both sides of the mountain summit, it occurs large scale juxtapositions of independent younger and older stratum blocks. Some researchers named this type of stratum overlay as klippe. But it is well known to all that the basic difference between klippe and sliding peak is their formation settings. That is to say the two tectonic units, klippe and window, are formed in a compressed system, while sliding peak and sliding window are formed in an extensional system (Table). Klippe and window are the two important structural units of the nappe tectonic system. The nappe tectonic system is defined in this paper as the platy or flaky mat-like blocks that undergo large-scale displacement under the compressed system, and can be divided into the folding and thrust nappe types. Generally speaking, klippe often outcrops while window develops in the frontal and trailing edges of the thrust nappe tectonic system, respectively. The sliding peak and sliding window

are the two important structural units of the slip tectonic system, which is defined in this paper as the platy or flaky sheet-like blocks that experience large-scale displacement under the extensional system. It can be divided into the extensional and gravitational slip types. We believe the Laguigangri and Kangma metamorphic core complexes, in a series of metamorphic core complex belts in northern South Tibet, are the products of extensional slipping [22], whereas the previously defined klippe and windows in the southern South Tibet should be the products of gravitational slipping.

Due to multilevel slipping, a rather complex phenomenon of summit strata stacking occur in southern Tibet, where the higher situated stratum at the mountain peak experiences greater slipping displacement. Thus one can see Carboniferous and Permian strata slipping above the basement of the Indian Craton, and Ordovician limestone strata slipping above Cambrian-Upper Proterozoic strata. As a result, the stratum column in this kind of slipping area becomes significantly thinner due to extensional and thinning actions. However, some scholars believed that the independent geological bodies bounded by the STDS in southern Tibet are klippe, and they pointed out that the klippe extend over 100 km from their northernmost outcrop toward the MCT [23]. Many other scholars also believe that these thinned independent geological bodies are klippe or windows formed by thrust compression.

We believe the movement of the detachment fault system may lead to the missing of Ordovician-Carboniferous strata in the Lesser Himalayan tectonic zone. Without sliding between the basement and caprock, the basement will uplift and occasionally with sliding peak on the basement's uplifting. The sliding peak and sliding window usually develop in the protruding region of the Himalayan arc. If they developed on the two sides of the Himalayan arc or occasionally on the basement's uplifting, they must have been formed by gravitational slip tectonics after the southern Tibet uplifting to a certain height.

The Rongbu Temple high-angle normal fault and STDS. In southern Tibet, a high-angle normal fault lies parallel to the South Tibet detachment system (STDS). This normal fault, however,



Differences between sliding and nappe structures

Различия между сдвиговыми и покровными структурами

Tectonic system	Nappe (Klippe)	Slip (Sliding Peak)	
		Extensional slip	Gravitational slip
Tectonic system	Compression system	Extensional system	Gravitational action in the background of uplifting
Tectonic deformation	Fault combination	Thrust faults	Normal faults
	Characteristics of folds	Mainly are overturned recumbent folds with thinned and pull-off inverted limbs	The down limb is inverted limb and well preserved
	Deformation of almonds etc.	Upright long axis with horizontal short axis, usually is upright ellipsoid	Opposite to the former, usually is flat ellipsoid
	Deformation sequence	Old stratum overthrows young stratum. Stratigraphic duplication	Opposite to the former, strata missing
	Deformed structures	Horizontal thinning, vertical thicken	Horizontal stretching, vertical thinning
Deformation under the structural plane	Compression-shortened	Weak extensional deformation	Obvious extensional deformation

is often ignored or outrightly classified as part of the STDS by scholars. But in fact, the fault is quite different from the STDS. For example, on the northern slope of the Chomulangma, the fault clearly extends into the Rongbu Temple area and is a trailing-edge structure of the early extruded structure, whereas the South Tibet detachment fault is clearly formed later. As early as 1974, while conducting scientific investigation in Tibet, Guo Tieying et al. discovered a large-scale normal fault in southern Tibet, and they explicitly proposed the name Rongbu Temple normal fault. After returning from Tibet, Guo was asked by Ma Xingyuan to write an article to report this discovery, as Ma thought of the Rongbu Temple normal fault a very important manifestation of extensional structures. But Guo never wrote this article due to busy schedules. Later on, while researching in the Ali area in western Tibet, Guo saw a high-angle normal fault extending E-W in southern Ali, and he believed this normal fault was the westward extension of the Rongbu Temple normal fault as shown in Fig. 1. We believe the active period of the Rongbu Temple normal fault could have started as early as before the Neogene. The activity of the normal fault controlled the distribution and output of the later Himalayan granite pluton. After pluton cooling (about 12–17 Ma), the STDS was formed by extensional tectonic

movement occurred in southern Tibet. In the Rongbu Temple and Chomulangma areas, it can be seen clearly that the STDS traces the early Rongbu Temple normal fault with a dip of more than thirty-five degrees, while in other areas the STDS extends with a dip of no more than twenty degrees beneath the Tibetan zone.

The cross-section of the Chomolangma area consists of four parts (Fig. 5, b). The 1st part is lower Ordovician limestone containing many vertical joints developing near-horizontally on the Chomolangma summit. The 2nd part at the bottom of lower Ordovician limestone overlaps Sinian-Cambrian clastic rocks with a type of ductile shear zone as the boundary. Some mylonites develop in the ductile shear zone, indicating the presence of extensional ductile shear zones. Because of the light-yellow limestone composition, some scholars call the 2nd part the “yellow stratum”, which develops in the middle of the Chomolangma with intralayer rheological characteristics. Under the yellow stratum is the 3rd part composed of Neoproterozoic-Cambrian clastic rocks such as shallow metamorphic and unmetamorphosed sedimentary rocks. Between the 3rd and 4th parts is a low dipping detachment consisting of strongly metamorphic crystalline rock series, including Middle-Neoproterozoic schist, gneiss, plagioclase amphibole and Miocene granulite.

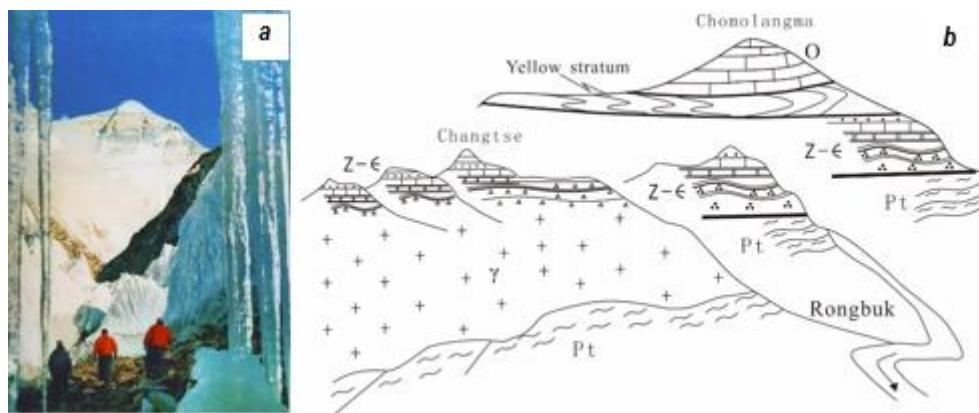


Fig. 5. A close view of the Chomolungma in 1974 (a) and geological sketch profile of the Chomolungma (b)
Рис. 5. Вид на Джомолунгму вблизи в 1974 г. (а) и геологический схематический разрез Джомолунгмы (б)

Multilevel extensional detachment faults can be seen in the Chomolungma area or elsewhere in southern Tibet. As shown in Fig. 6, an extensional slip fault develops between Upper Proterozoic-Cambrian and Upper-Middle Proterozoic strata; a second one develops between Early Paleozoic (Ordovician) and Upper Proterozoic-Cambrian strata, reconstructing the angular unconformity between the Ordovician and Precambrian representing the Pan-African movement; and a third one develops between Permian or Devonian and Silurian or Ordovician strata.

From the above description, we can make the following inferences. The Rongbu Temple normal fault paired with the MCT to form so called “horse structures” during the intercontinental collision. The uneven movements of the “horse structures”, due to different thrust velocities and amplitudes and varying degrees of severe weathering and erosion, led to the formation of two extruded tectonic belts, with very different topography to the surrounding landforms in southern Tibetan Plateau, where the extensional sliding tectonic belts developed in a later stage. The STDS is formed

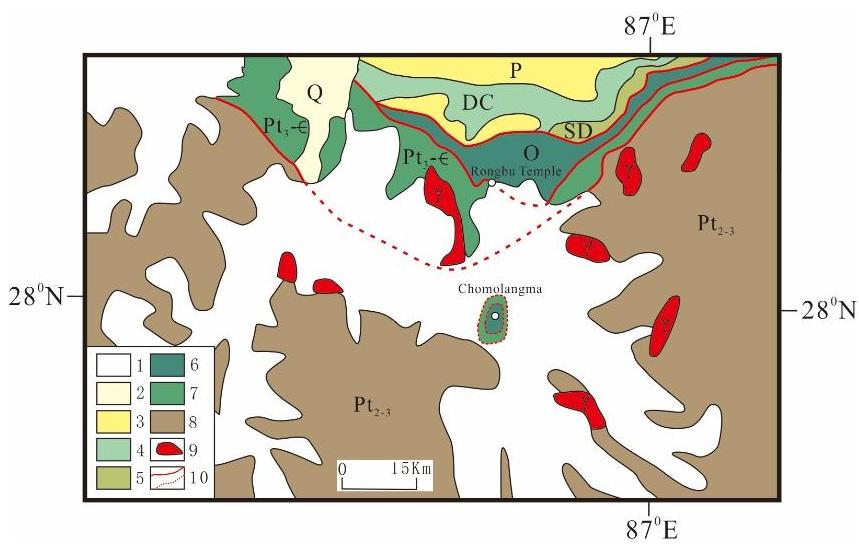


Fig. 6. Sketch map of the Chomolungma area:
1 – glacial covered area; 2 – Quaternary sediments; 3 – Permian sediments; 4 – Devonian-Carboniferous sediments; 5 – Silurian-Devonian sediments; 6 – Ordovician sediments; 7 – Upper Proterozoic-Cambrian sediments; 8 – Upper-Middle Proterozoic sediments; 9 – Neogene granite; 10 – fault or snow-covered fault

Рис. 6. Схематическая карта района Джомолунгмы:

1 – область ледникового покрова; 2 – четвертичные отложения; 3 – пермские отложения; 4 – отложения девона – карбона; 5 – отложения силура – девона; 6 – отложения ордовика; 7 – отложения верхнего протерозоя – кембрия; 8 – отложения верхнего – среднего протерозоя; 9 – граниты неогена; 10 – разлом или разлом, перекрытый снегом



in an extensional environment created by extreme compression; and the appearance of leucogranite indicates the STDS movement in an extensional setting. The STDS is huge and complex with three common detachment planes. The largest plane separates the basement (Pt_{2-3}) and caprocks of the Tibetan Plateau. The second one lies between Upper Proterozoic-Cambrian and Ordovician or Silurian strata. And the third one separates Ordovician and Devonian or Carboniferous strata. Because the STDS has detachment properties in the deep and slip-off characteristics in the shallow, it may be characterized more precisely as a detachment-slip system. The STDS is particularly developed around the Himalayan arc top with huge sliding displacement, where Carboniferous sliding stratum slides onto the basement of the Indian craton, and the sliding body (sliding surface) steps down as it makes contacts with the Rongbu Temple normal fault. Therefore, we suggest that the Rongbu Temple normal fault and the STDS are two faults of different ages and they overlap the Himalaya arc top (Fig. 1).

The following can be inferred from the above analysis:

1. The Rongbu Temple normal fault truly exists. It pairs with the MCT in the early stage to form two boundaries of lateral extruded structures

enriched with “horse structures” in southern Tibet (Fig. 7). The extrusion can be modeled by numerical simulation [24]. This lateral extruded structure is formed after the collision between the Indian and Asian-Eurasian plates, as the smaller Indian plate suddenly stopped to cause N-S compression of the bigger Asian-Eurasian plate.

2. After the lateral extruded structure is formed, the STDS became active because of the N-S extension. The STDS has a gentle dip angle across southern Tibet and a high dip angle locally in the northern Chomolangma in tracking with the early Rongbu Temple normal fault (Fig. 7). The detachment fault system, the Rongbu Temple normal fault and the thrust faults are the structures of different properties and formation ages.

The Laguigangri metamorphic core complex, STDS and MCT. In South Tibet, the Kangma, Saka, Laguigangri and Yalaxiangbo Domes form a near W-E trending metamorphic core complex chain consisting of a core, a middle section with ductile rheology and cap rocks. Precambrian rocks (deformed granite and meta-sedimentary rocks) with high metamorphism and deformation make up the core, inside which develops multi-stage emplacement granites. The middle section is made up of low dip angle detachment faults (with ductile rheology), separating the core and

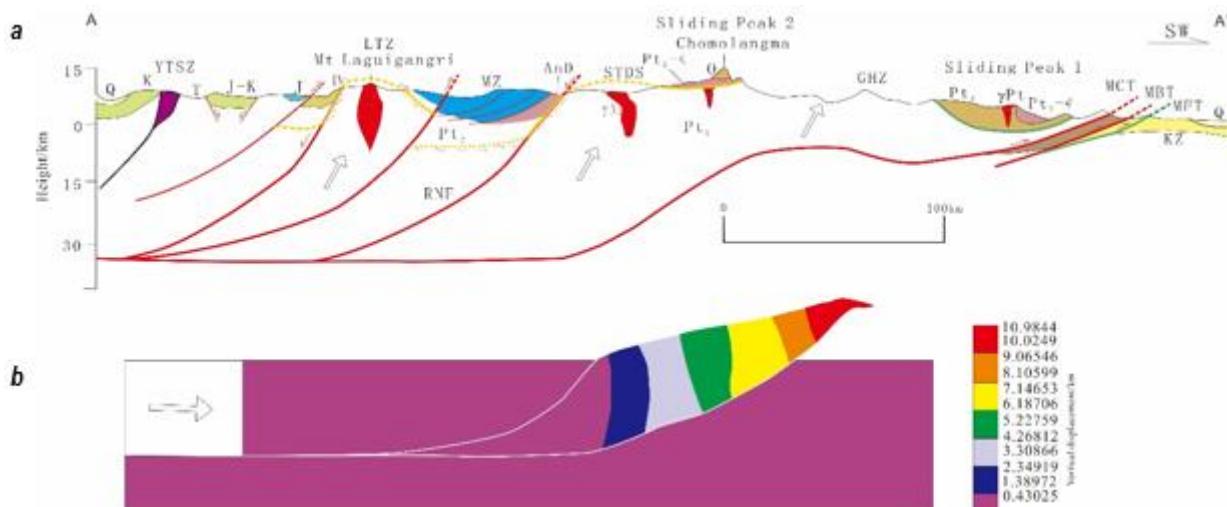


Fig. 7. Cross-section of the Chomolangma area (a); finite element modeling of the vertical extrusion of the Higher Himalayan Zone (adapted from [24]) (b):

YTSZ – Yarlung-Tsango suture zone; LTZ – Laguigangri tectonic zone;
 RNT – Rongbu Temple normal fault; HHZ – High Himalayan tectonic zone;
 STDS, MCT, MBT and MFT – see Fig. 2.

Рис. 7. Разрез в районе Джомолунгмы (а); моделирование вертикальных экструзий зоны Верхних Гималаев методом конечных элементов (по материалам источника [24]) (б):

YTSZ – сутурная зона Ярлунг-Цанго; LTZ – тектоническая зона Лагуйганжи;
 RNT – сброс храма Жунбу; HHZ – тектоническая зона Высоких Гималаев;
 STDS, MCT, MBT and MFT – см. рис. 2.



cap rocks. These detachment faults, distributed in an arc shape and must be a part of the STDS, develop undulately between the basement and cap rocks. Because of the late stage fast uplifting and denudation, these detachment faults are not seen in some locations including the northern High Himalayan and northern Tethys Himalayan. Xu et al. [6] also considered the detachment fault, developed between the basement and cap rocks of the Laguigangri metamorphic dome, a part of the northward extension of the STDS and formed during 20–16 Ma. They argued that the cap rocks are the shallow metamorphic or unmetamorphic Tethys sequences, consisting of many kind of rocks including Ordovician marble and schist, Carboniferous marble, crystalline limestone, speckled slate, Permian arenaceous slate and gravel slate, metamorphic quartz sandstone, very low grade metamorphic Triassic fauxite, etc. These arc-shaped detachment faults should be part of the STDS developing in the detachment system with S-N undulating waves between the metamorphic basement and sedimentary (shallow metamorphic) cap-rock [22, 25].

Some scholars believed that the High Himalayan structural zone (HHZ), bounded by the STDS and MCT, is a vertical extrusion. However, the Laguigangri metamorphic core complex and STDS are the products of extensional structural setting, while the MCT is of compressional setting. According to the numerical modeling analysis, the STDS and MCT never merged but define respectively the top and the bottom of a channel flow of low-viscosity lower crust expulsed from beneath the Tibetan Plateau [26]. Furthermore, we consider the two fault systems formed in different periods by different mechanisms. So we believe that the South Tibet detachment system couldn't pair with the MCT to form HHZ. Accompanied by Miocene granite magma activity, the Laguigangri metamorphic core complex should be formed at the same time as the STDS, and both are the products of the N-S trending thermal uplifting extension in southern Tibet.

Division and characteristics of Cenozoic multistage evolution

The formation of the Qinghai-Tibet Plateau is an important geological event in the Earth's evolutionary history. Many scholars have put forth

many ideas to explain the genesis of the plateau, including the intracontinental subduction model, oblique slice thickening-lateral extrusional escape model, bidirectional subduction with multiple driving model, tunnel flow (channel flow) model, wedge-shaped extrusion model, longitudinal extension model, lithosphere-mantle delamination model, gravitational expansion and collapse model, and so on. Although these models can offer some explanations, we believe a better explanation can come from the opening-closing view, that is, the plateau is formed by the opening and closing of different parts of the earth at different stages, or to say, by the coupling effects of opening and closing.

We believe the formation of the Himalayas and the rise of the Mt Everest are related to the disappearance of the Neo-Tethys Ocean, once located between the Indian and Asian-Eurasian Plates in the Mesozoic-Cenozoic, as a result of continuous collision and extrusion of the two plates and their extension and detachment after orogeny. And all these events are caused by crustal movements at different stages contemporaneous with multiform movements (repeated horizontal-vertical movements) and multisystem (extrusion-extension) transformation. Based on regional geological surveys and combining with previous research results, we consider the plateau experienced two evolutionary cycles of opening and closing from the formation of the Neo-Tethys Ocean to the rising of the Chomolangma to its current height after the intracontinental collision. After the Tethys ocean opening, the plateau began a strong opening-closing transitional process. The evolutionary process can generally be divided into different opening-closing cycles, manifested by different systems such as oceanic expansion (opening) and crustal sinking (conversion), intercontinental collision and compression (closing), intracontinental relaxation-collapse and extensional detachment (conversion), and sliding with thermo-uplifting and uplifting of the entire plateau (opening). In this complex and multistage evolutionary process, thermal energy (thermal matters) in the deep earth plays an important role as in the plateau uplifting process, such that molten mantle material continues to move upwards and migrates horizontally on different geospheres multiple times. That is to say, the hot



material experiences multiple vertical to horizontal transitions when it moves from the deep to the shallow part of the earth; and such movements can cause opening-closing transitions at different layers and spheres of the earth [27, 28].

The intercontinental collision (closing) stage (55–30 Ma). The formation process of the extruded structure in southern Tibet occurred in the closing stage of the Cenozoic. During this stage, the Neo-Tethys crust had disappeared; and the Indian continent, south of the Tethys ocean, began to collide with the Asian-Eurasian continent north of the Tethys ocean. Here we believe that the Indian continent at that time was quite smaller than the Eurasia continent, and because of its relatively light weight and therefore rather fast drifting speed, it became separated from the southern Gondwana. After the collision, the Indian continent developed many arc-shaped southward compressional thrusts due to extreme N-S compression; at the same time, the Himalayan area developed several lateral extrusions with “horse structures” related to corresponding magmatic activity. The bottom of the extrusions – a converging area of a series of arc-shaped thrust faults and high dip angle normal faults – should be in the middle crust at a depth of about 30–40 km. The wedge-shaped Chomolangma extrusion with large extusion range and higher rising speed, gradually rose highest above the entire extrusion, while the HHZ-MCT extrusion reached its highest elevation and became the sliding Peak One. Due to tectonic stress in the middle and lower crust and gravitational potential energy, the southern Tibet and eastern (ES) and western (WS) syntaxes experienced increasing pressure and strain rate, so resulted in local transient high pressure. Under this condition, eclogite was formed during an ultra-high pressure metamorphic event.

Here, we believe that before the Miocene, the Chomolangma, the highest point on the topography map nowadays, was not the highest place but second to the HHZ south of the Chomolangma. Later, because of differential uplifting-descending movements of the two extrusions and northward sliding of the small dip angle extensional fault in southern Chomolangma, as well as isostatic adjustment, the Chomolangma came into being the highest place on earth, replacing

the High Himalaya Zone. Since then, affected by severe weathering and erosion, the once uplifting zone – the sliding Peak One (the High Himalaya vertical extrusion in southern Chomolangma), and the once slope caused by slippage (the missed STDS in the High Himalayan vertical extrusion), are not visible on the Earth's surface today. In fact, residual STDS still remains on the Chooyu mountain and Mount Everest. For example, the detachment fault beneath the “yellow zone” on top of the Mount Everest is just the residual STDS. But because it develops on such high elevation and covered by nowadays topographic features, it could not be seen by many scholars except mountaineers. Hence, this phenomenon is not acknowledged by some experts and scholars.

Intracontinental relaxation-collapse and extension-detachment (transition) stage (20–7 Ma). The interior and southern part of the Qinghai-Tibet Plateau began to stretch and relax accompanied by the upwelling of thermal fluid, causing new asthenospheric thermal uplifting. At the same time, the thickened lower crust softened thermally and the middle crust gathered a large number of thermal masses. So the transition stage is defined as the tectonic system in southern Tibet switching from compression (closing) to extension types (opening), followed by horizontal extensive detachment marked by ductile shear formation. It happened outside the early extrusions and the sliding Peak TWO was formed. In addition, the main detachment and sliding planes are formed with a large amount of magmatic emplacement, causing the wide distribution of the New Himalayan leucogranite dykes in the Himalaya orogeny [29, 30]. Abundant kinematic indicators are well developed in deformed leucogranites (granitic mylonites) and gneiss on both microscopic and outcropping scales (e.g., S-C fabrics, asymmetric rotational porphyroclasts, mineral-stretching lineation, dislocation of quartz, and domino structures, mica-fish fabrics, asymmetric mylonitic folds and small scale normal faults), indicating a top-to-north movement of multistage, multilayer ductile shear zones [31]. Involving a series of slippary structures in southern Tibet, the Qinghai-Tibet Plateau began to rise as a whole. At last, a series of N-S trending normal faults formed in the interior of the plateau while



the periphery of the plateau experienced outward thrust, activating some of the early thrust faults.

Sliding thermal fluid rising and the plateau overall rapid uplifting (open) stage (Since 7 Ma). In the late Miocene after the delamination and thinning of the southern Tibet lithosphere, large amounts of thermal fluids surged (vertical opening) from the asthenosphere, then isostatic adjustment happened and intra-continent began to slip (horizontal opening). The entire Qinghai-Tibet Plateau rose (open) quickly by the cooperation of mantle thermal flow and climate [32, 33]. Consequently, the periphery of the plateau experienced compression while the internal part experienced violent extension. This phenomenon was described as a "flowering bun" by Professor Guo Tieying in the early 1980s.

Overall, the upwelling of the mantle thermal fluid, the multistage multisystem crustal extension (thrust) and isostatic adjustment created the present tectonic landforms of the Everest and its surrounding areas. Due to Cenozoic detachment deformation on the north and south sides of the Everest, some basins exhibit overlaying of younger strata over the older ones; and some heat-releasing structures, such as hot springs, appear in the N-S trending grabens caused by the N-S direction thermal upwelling. So the normal fault on the north side of the Everest is a gigantic regional fault, which controls the distribution and output of magmatite in the formation of the Laguigangri and Everest thermal domes. Thus it can be certain that the magmatic and normal fault activities in this region were contemporaneous.

Fission track analysis reveals that the final cooling and exposing events in the high Himalayas mainly occurred since 7–5 Ma [34–37]. The Himalayan ES and WS syntaxes show a dramatic cooling and denudation history since 3 Ma, whereas the western tectonic nodule had an average delamination rate of 4.5 mm/a since 10 Ma, with at least 14 km materials eroded since 1 Ma [38]. Low-temperature studies show that the average erosion rate in the Nanga Bawa area was as high as 3.6 mm/a since 5 Ma [39]. Our apatite and zircon fission track analysis of the Dinggye leucogranite reveals that the cooling and erosion rates were 18.421 °C/Ma and 0.526 mm/a, respectively, in the Himalayan region since 5.7 Ma

[36]. Other studies have shown that in the Lesser Himalayan crystalline belt of Sutlej, India the denudation rate was 1.8 mm/a since the Pliocene epoch [40], and the Zada Basin began to sag at 5.1 Ma [41] and the submarine fan deposits in the Bay of Bengal saw increased deposition rate at about 5 Ma [42].

In the North Himalayan tectonic belt, tectonic activities since 3.6 Ma are mainly characterized by the formation of a series of near N-S graben associated thermal anomalies, while the near W-E fault structures are relatively inactive. The violent tectonic uplifting, and increase in geomorphic contrast since 3.6 Ma, are characterized by the widespread occurrence of molasses accumulation in the foothills, and by a significant increase of sedimentary rate in the basin. The sediment of the Siwalik Group in the Ganges Plain in southern Himalayas is obviously thickened with conglomerate deposits at about 3.6 Ma, when a series of near N-S graben-type basins along the northern Himalayas converted into coarse clastic conglomerate deposits, such as the Gomba conglomerate in the Gyron basin. The Asian monsoon strengthened again in the 3.6–2.6 Ma time interval [43]. The Gyron basin began to deposit the Gomba conglomerate at 2.4 Ma till 1.7 Ma as the basin shrank and ended its deposition [44]. In the southern foothills of the Himalayas, macro-conglomerate covered the Siwalik Group, while the Kashmir basin began to form in the northwestern foothills of the Himalayas [45]. Ding Lin et al. studied the fission track thermochronology of the Gangdese magma [46] in the periphery of the ES syntax of the Himalayan, and concluded that the ES syntax has a strong uplifting since 3.4 Ma and the High Himalayan tectonic belt has a strong uplifting and erosion since 3.6 Ma. Systematic zircon and apatite fission track analyses of the High Himalayan crystalline sequences all showed a good linear relationship between age and elevation, suggesting significantly accelerated cooling and denudation since 3.6 Ma.

Under the gravitational force, the sliding Peak One, the then highest peak in south of the Chomulangmo, underwent extensive gravitational collapse with southward and northward extension slipping; as a result, the Chomulangmo became the highest peak in the Pliocene epoch. What's more, the sliding Peak Two (in the Chomulangmo



area) underwent southward- and northward-directed detachments after that time, causing a large-scale stratum column thinning at the Everest summit. Thermal materials surged upward from the middle-lower crust, forming thermal anomalies such as hot springs in the N-S grabens. The tectonic and climatic factors [47] jointly restricted fast uplifting and exhumation on the southern slope of the Himalayas as well as formation of an abnormally high altitude Himalayan main ridge. The dual effects of extension and strong erosion caused by the climate have led to the formation of abnormally high-altitude mountain ranges around the peripheral plateau. After that, the strengthening of the monsoons caused the final formation of the peripheral mountain systems and mountain-basin coupling structures. To sum up, the upwelling of mantle thermal fluids, the crustal multistage and multisystem extension (thrust) and isostatic adjustment jointly create the current tectonic features of the Chomulangma and its surrounding areas.

A deeper understanding of opening-closing orogenic process requires us to concentrate our efforts more on the detailed geological record for evidence of persistent process than on the temporal evolution of geological structures and landforms. We must also examine the internal differences between the opening-closing view and the plate tectonic theory.

Conclusions

In this contribution, we use the opening-closing tectonic view to analyze several basic geological phenomena in southern Tibet and obtain some new ideas different from the plate tectonic theory. We then further analyze the Cenozoic evolutionary process of opening-closing in South Tibet and obtain the following main insights:

1. The Rongbu Temple normal fault, the MCT and other thrust faults form a lateral extrusion structure in southern Tibet. The South Tibet detachment system (STDS), the Rongbu Temple normal fault and the MCT are the products of different times and systems.
2. The klippe and windows in southern Tibet, identified by previous researchers, are formed later in an extensional setting, rather than a thrust compression setting, and belongs to the slip system.
3. The evolutionary process of southern Tibet can be divided into five different stages characterized as opening-opening-closing-opening-opening. Thermal energy and gravitational potential energy in the deep earth played a key role during this opening-closing evolutionary process. Several vertical switching movements occurred accompanied by the deep thermal matter migration from the interior to the exterior of the Earth.

References

1. Yang WR. Some problems of opening-closing tectonics. *Geological Bulletin of China*. 2004;23(3):195–199.
2. Jiang CF. An introduction to opening-closing tectonics. *Geological Bulletin of China*. 2004;23(3):200–207.
3. Heim A, Gansser A. Central Himalaya: Geological observations of Swiss expedition, 1936. *Mémoire, Société Helvétique Science Naturelle*. 1939;73:1–245.
4. Harrison TM, Ryerson FJ, Le Fort P, Yin A, Lovera O, Catlos EJ. A late Miocene-Pliocene origin for the Central Himalayan inverted metamorphism. *Earth and Planetary Science Letters*. 1997;146:1–8.
5. Hodges KV, Hurtado JM, Whipple KX. Southward extrusion of Tibetan crust and its effect on Himalayan tectonics. *Tectonics*. 2001;20(6):799–809. <https://doi.org/10.1029/2001TC001281>
6. Xu ZQ, Wang Q, Zeng LS, et al. Three-dimensional extrusion model of the Great Himalaya slice. *Geology in China*. 2013;40(3):671–680.
7. Arita K. Origin of the inverted metamorphism of the Lower Himalayas, Central Nepal. *Tectono-*physics. 1983;95(1-2):43–60. [https://doi.org/10.1016/0040-1951\(83\)90258-5](https://doi.org/10.1016/0040-1951(83)90258-5)
8. Le Fort P. Himalayas: the collided range. Present knowledge of the continental arc. *American Journal of Science*. 1975;275A:1–44.
9. Leloup PH, Maheo G, Amaud N, Kali E, Boutonnet E, Liu D, et al. The South Tibet detachment shear zone in the Dinggye area: time constraints on extrusion models of the Himalayas. *Earth Planetary Science Letter*. 2010;292:1–16.
10. Burg JP, Chen GM. Tectonics and structural formation of southern Tibet, China. *Nature*. 1984;311:219–223. <https://doi.org/10.1038/311219a0>
11. Burchfiel BC, Chen ZL, Hodges KV, Liu Y, Leigh HR, Deng C, et al. The south Tibetan detachment system, Himalayan Orogen: extension contemporaneous with and parallel to shortening in a collisional mountain belt. *Special Paper-Geological Society of America*. 1992;269:1–41. <https://doi.org/10.1130/SPE269-p1>



12. Hodges KV, Parrish RR, Searle MP. Tectonic evolution of the central Annapurna Range, Nepalese Himalayas. *Tectonics*. 1996;15(6):1264–1291. <https://doi.org/10.1029/96TC01791>
13. Searle MP, Simpson RL, Law RD, Parrish R, Waters DJ. The structure geometry, metamorphic and magmatic evolution of the Everest massif, High Himalaya of Nepal-South Tibet. *Journal of the Geological Society*. 2003;160(3):345–366. <https://doi.org/10.1144/0016-764902-126>
14. Liu X, Siebel W, Li J, Xiao X. Characteristics of the Main Central thrust and southern Tibetan detachment in the Tingri area, southern Tibet, and ages of their activities. *Geological Bulletin of China*. 2004;23(7):636–644.
15. Searle MP, Szulc AG. Channel flow and ductile extrusion of the high Himalayan slab—the Kangchenjunga-Darjeeling profile, Sikkim Himalaya. *Journal of Asian Earth Science*. 2005;25(1):173–185. <https://doi.org/10.1016/j.jesae.2004.03.004>
16. Meigs AJ, Burbank DW, Beck RA. Middle late Miocene (>10 Ma) formation of the Main Boundary Thrust in the western Himalaya. *Geology*. 1995;23(5):423–426. [https://doi.org/10.1130/0091-7613\(1995\)023<0423:MLMMFO>2.3.CO;2](https://doi.org/10.1130/0091-7613(1995)023<0423:MLMMFO>2.3.CO;2)
17. DeCelles PG, Gehrels GE, Quade J, Ojha TP. Eocene-early Miocene foreland basin development and the history of Himalayan thrusting, western and central Nepal. *Tectonics*. 1998;17(5):741–765. <https://doi.org/10.1029/98TC02598>
18. Gansser A. *The geology of the Himalayas*. New York: Wiley Inter-science; 1964. 289 p.
19. Nakata T. Active faults of the Himalaya of India and Nepal. In: Malinconico Jr. LL, Lillie RJ (eds.). *GSA Special Papers*. Vol. 232. *Tectonics of the western Himalayas*. Boulder: Geological Society of America; 1989. p.243–264.
20. Scheling D, Arita K. Thrust tectonics, crustal shortening, and the structure of the far-eastern Nepal, Himalaya. *Tectonics*. 1991;10(5):851–862. <https://doi.org/10.1029/91TC01011>
21. Zhao W, Nelson KD, Che J, Quo J, Lu D, Wu C, et al. Deep seismic reflection evidence for continental underthrusting beneath southern Tibet. *Nature*. 1993;366:557–559. <https://doi.org/10.1038/366557a0>
22. Liu DM. The research about extensional metamorphic core complexes in Dingjie, Xizang. *Contributions to Geology and Mineral Resources Research*. 2003;18(1):1–5.
23. Yin A. Cenozoic tectonic evolution of the Himalayan orogen as constrained by along strike variation of structural geometry, exhumation history, and foreland sedimentation. *Earth Science Frontiers*. 2006;13(5):416–515.
24. Zeng ZY, Yang WR, Franz N, Liu LL, Guo TY. Extrusion tectonics in orogenic belt. *Geological Science and Technology Information*. 2001;20(1):1–7.
25. Liu DM, Li DW. Detachment faults in Dinggye area, middle segment of Himalayan orogenic belt. *Geotectonica et Metallogenica*. 2003;27(1):37–42.
26. Beaumont C, Jamieson RA, Nguyen MH, Lee B. Himalayan tectonics explained by extrusion of a low-viscosity crustal channel coupled to focused surface denudation. *Nature*. 2001;414:738–742.
27. Yang WR, Jiang CF, Zhang K, et al. Opening-closing tectonics: exploration of a new idea on global tectonics. *Earth Science Frontiers*. 2016;23(6):42–60.
28. Yang WR, Jiang CF, Zhang K, et al. Discussions on opening-closing-rotating tectonic system and its forming mechanism and on the dynamic mechanism of plate tectonics. *Earth Science Frontiers*. 2019;26(1):337–355.
29. Zhang HF, Harris N, Parrish R, et al. U-Pb ages of the Kudui and Sakya Pale Granites in the Sakya Dome, northern Himalayas and their geological significance. *Chinese Sciences Bulletin*. 2004;49:2090–2094.
30. Wu FY, Liu ZC, Liu XC, et al. Himalayan leucogranite: Petrogenesis and implications to orogenesis and plateau uplift. *Acta Petrologica Sinica*. 2015;31(1):1–36.
31. Liu DM, Li DW, Yang WR. Study of mylonite and deformation of ductile shear zone, Dingjie area. *Earth Science Frontiers*. 2003;10(2):479–486.
32. Zhang JJ, Ding L, Zhong DL, et al. Himalayan extension parallel to an orogenic belt: a sign of collapse or a product of compression uplift? *Chinese Sciences Bulletin*. 1999;44(19):2031–2036.
33. Wang CY, Wan JL, Li DM, Li Q, Qu GS. Thermo-chronological evidence of tectonic uplift in Nyalam, south Tibetan detachment system. *Bulletin of Mineralogy, Petrology and Geochemistry*. 2001;20(4):292–294.
34. Sorkhabi RB, Stump E, Foland KA, Jainc AK. Fission-track and $^{40}\text{Ar}/^{39}\text{Ar}$ evidence for episodic denudation of the Gangotri granites in the Garhwal Higher Himalaya, India. *Tectonophysics*. 1996;260(1-3):187–199. [https://doi.org/10.1016/0040-1951\(96\)00083-2](https://doi.org/10.1016/0040-1951(96)00083-2)
35. Burbank DW, Blythe AE, Putkonen J, Pratt-Sitaula B, Gabet E, Oskinet M, et al. Decoupling of erosion and precipitation in the Himalayas. *Nature*. 2003;426:652–655. <https://doi.org/10.1038/NATURE02187>
36. Liu DM, Li DW, Yang WR, Wang XF, Zhang JY. Evidence from fission track ages for the Tectonic uplift of the Himalayan Orogen during Late Cenozoic. *Earth Science – Journal of China University of Geosciences*. 2005;30(2):147–152.
37. Abrahami R, van der Beek P, Huyghe P, Hardwick E, Carcaillet J. Decoupling of long-term exhumation and short-term erosion rates in the Sikkim Himalaya. *Earth and Planetary Science Letters*. 2016;433:76–88. <https://doi.org/10.1016/j.epsl.2015.10.039>
38. Zeitler PK. Cooling history of the NW Himalaya, Pakistan. *Tectonics*. 1985;4(1):127–151. <https://doi.org/10.1029/TC004i001p00127>
39. Burg JP, Nievergelt P, Oberli F, Seward D, Davy P, Maurin JC, et al. The Namche Barwa syntaxis: evidence for exhumation related to compressional crustal folding. *Journal of Asian Earth Science*. 1998;16(2-3):239–252. [https://doi.org/10.1016/S0743-9547\(98\)00002-6](https://doi.org/10.1016/S0743-9547(98)00002-6)
40. Vannay JC, Grasemann B, Rahn M, Frank W, Carter A, Baudraz V, et al. Miocene to Holocene exhumation of metamorphic crustal wedges in the NW Himalaya: evidence for tectonic extrusion coupled to fluvial erosion. *Tectonics*. 2004;23(1):1–24. <https://doi.org/10.1029/2002TC001429>



41. Zhu DG, Meng XG, Shao ZG, et al. The formation and evolution of Zhada basin in Tibet and the uplift of the Himalayas. *Acta Geoscientica Sinica*. 2006;27(3):193–200.
42. Shi YF, Li JJ, Li BY. *Uplift and environmental change of the Tibetan plateau during the late Cenozoic*. Guangzhou: Guangdong Science and Technology Publishing House; 1998.
43. Zheisheng A, Kutzbach JE, Prelli WL, Porter SC. Evolution of Asian monsoons and phased uplift of the Himalaya-Tibetan Plateau since Late Miocene times. *Nature*. 2001;411:62–66. <https://doi.org/10.1038/35075035>
44. Wang FB, Li SF, Shen XH, et al. Formation and evolution of the Gyirong County Basin, environmental changes and Himalayan uplift. *Science in China. Series D*. 1996;26:329–335.
45. Shi YF, Li JJ, Li BY, Yao TD, Wang SM, Li SJ, et al. Uplift of the Qinghai-Xizang (Tibetan) plateau and east Asia environmental change during Late Cenozoic. *Acta Geographica Sinica*. 1999;54(1):10–21.
46. Ding L, Zhong DL, Pan YS, et al. Evidence of fission tracks that have rapidly increased since the Pliocene in the Eastern Himalayan syntaxis. *Chinese Science Bulletin*. 1995;40(16):1479–1500.
47. Zheng Y, Zhang J, Wang J, Zhang B, Wang X, Wang M. Rapid denudation of the Himalayan orogen in the Nyamal area, southern Tibet, since the Pliocene and implications for tectonics-climate coupling. *Chinese Science Bulletin*. 2014;59:874–885. <https://doi.org/10.1007/s11434-014-0116-x>

Библиографический список

1. Yang W.R. Some problems of opening-closing tectonics // *Geological Bulletin of China*. 2004. Vol. 23. Iss. 3. P. 195–199.
2. Jiang C.F. An introduction to opening-closing tectonics // *Geological Bulletin of China*. 2004. Vol. 23. Iss. 3. P. 200–207.
3. Heim A., Gansser A. Central Himalaya: Geological observations of Swiss expedition, 1936 // *Mémoire, Société Helvétique Science Naturelle*. 1939. Vol. 73. P. 1–245.
4. Harrison T.M., Ryerson F.J., Le Fort P., Yin A., Lovera O.M., Catlos E.J. A late Miocene-Pliocene origin for the Central Himalayan inverted metamorphism // *Earth and Planetary Science Letters*. 1997. Vol. 146. P. 1–8.
5. Hodges K.V., Hurtado J.M., Whipple K.X. Southward extrusion of Tibetan crust and its effect on Himalayan tectonics // *Tectonics*. 2001. Vol. 20. Iss. 6. P. 799–809. <https://doi.org/10.1029/2000TC001281>
6. Xu Z.Q., Wang Q., Zeng L.S., et al. Three-dimensional extrusion model of the Great Himalaya slice // *Geology in China*. 2013. Vol. 40. Iss. 3. P. 671–680.
7. Arita K. Origin of the inverted metamorphism of the Lower Himalayas, Central Nepal // *Tectonophysics*. 1983. Vol. 95. Iss. 1-2. P. 43–60. [https://doi.org/10.1016/0040-1951\(83\)90258-5](https://doi.org/10.1016/0040-1951(83)90258-5)
8. Le Fort P. Himalayas: the collided range. Present knowledge of the continental arc // *American Journal of Science*. 1975. Vol. 275A. P. 1–44.
9. Leloup P.H., Maheo G., Amaud N., Kali E., Boutonnet E., Liu D., et al. The South Tibet detachment shear zone in the Dinggye area: time constraints on extrusion models of the Himalayas // *Earth Planetary Science Letter*. 2010. Vol. 292. P. 1–16.
10. Burg J.P., Chen G.M. Tectonics and structural formation of southern Tibet, China // *Nature*. 1984. Vol. 311. P. 219–223. <https://doi.org/10.1038/311219a0>
11. Burchfiel B.C., Chen Z.L., Hodges K.V., Liu Y., Leigh H.R., Deng C., et al. The south Tibetan detachment system, Himalayan Orogen: extension contemporaneous with and parallel to shortening in a collisional mountain belt // *Special Paper-Geological Society of America*. 1992. Vol. 269. P. 1–41. <https://doi.org/10.1130/SPE269-p1>
12. Hodges K.V., Parrish R.R., Searle M.P. Tectonic evolution of the central Annapurna Range, Nepalese Himalayas // *Tectonics*. 1996. Vol. 15. Iss. 6. P. 1264–1291. <https://doi.org/10.1029/96TC01791>
13. Searle M.P., Simpson R.L., Law R.D., Parrish R., Waters D.J. The structure geometry, metamorphic and magmatic evolution of the Everest massif, High Himalaya of Nepal-South Tibet // *Journal of the Geological Society*. 2003. Vol. 160. Iss. 3. P. 345–366. <https://doi.org/10.1144/0016-764902-126>
14. Liu X., Siebel W., Li J., Xiao X. Characteristics of the Main Central thrust and southern Tibetan detachment in the Tingri area, southern Tibet, and ages of their activities // *Geological Bulletin of China*. 2004. Vol. 23. Iss. 7. P. 636–644.
15. Searle M.P., Szulc A.G. Channel flow and ductile extrusion of the high Himalayan slab-the Kangchenjunga-Darjeeling profile, Sikkim Himalaya // *Journal of Asian Earth Science*. 2005. Vol. 25. Iss. 1. P. 173–185. <https://doi.org/10.1016/j.jseae.2004.03.004>
16. Meigs A.J., Burbank D.W., Beck R.A. Middle late Miocene (>10 Ma) formation of the Main Boundary Thrust in the western Himalaya // *Geology*. 1995. Vol. 23. Iss. 5. P. 423–426. [https://doi.org/10.1130/0091-7613\(1995\)023<0423:MLMMFO>2.3.CO;2](https://doi.org/10.1130/0091-7613(1995)023<0423:MLMMFO>2.3.CO;2)
17. DeCelles P.G., Gehrels G.E., Quade J., Ojha T.P. Eocene-early Miocene foreland basin development and the history of Himalayan thrusting, western and central Nepal // *Tectonics*. 1998. Vol. 17. Iss. 5. P. 741–765. <https://doi.org/10.1029/98TC02598>
18. Gansser A. *The geology of the Himalayas*. New York: Wiley Inter-science, 1964. 289 p.
19. Nakata T. Active faults of the Himalaya of India and Nepal // *GSA Special Papers*. Vol. 232. *Tectonics of the western Himalayas* / eds. L.L. Malinconico Jr., R.J. Lillie. Boulder: Geological Society of America, 1989. P. 243–264.
20. Scheling D., Arita K. Thrust tectonics, crustal shortening, and the structure of the far-eastern Nepal, Himalaya // *Tectonics*. 1991. Vol. 10. Iss. 5. P. 851–862. <https://doi.org/10.1029/91TC01011>
21. Zhao W., Nelson K.D., Che J., Quo J., Lu D., Wu C., et al. Deep seismic reflection evidence for continental underthrusting beneath southern Tibet // *Nature*. 1993. Vol. 366. P. 557–559. <https://doi.org/10.1038/366557a0>



22. Liu D.M. The research about extensional metamorphic core complexes in Dingjie, Xizang // Contributions to Geology and Mineral Resources Research. 2003. Vol. 18. Iss. 1. P. 1–5.
23. Yin A. Cenozoic tectonic evolution of the Himalayan orogen as constrained by along strike variation of structural geometry, exhumation history, and foreland sedimentation // Earth Science Frontiers. 2006. Vol. 13. Iss. 5. P. 416–515.
24. Zeng ZY, Yang WR, Franz N, Liu LL, Guo TY. Extrusion tectonics in orogenic belt // Geological Science and Technology Information. 2001. Vol. 20. Iss. 1. P. 1–7.
25. Liu D.M., Li D.W.. Detachment faults in Dinggye area, middle segment of Himalayan orogenic belt // *Geotectonica et Metallogenica*. 2003. Vol. 27. Iss. 1. P. 37–42.
26. Beaumont C., Jamieson R.A., Nguyen M.H., Lee B. Himalayan tectonics explained by extrusion of a low-viscosity crustal channel coupled to focused surface denudation // *Nature*. 2001. Vol. 414. P. 738–742. <https://doi.org/10.1038/414738a>
27. Yang W.R., Jiang C.F., Zhang K., et al. Opening-closing tectonics: exploration of a new idea on global tectonics // Earth Science Frontiers. 2016. Vol. 23. Iss. 6. P. 42–60.
28. Yang W.R., Jiang C.F., Zhang K., et al. Discussions on opening-closing-rotating tectonic system and its forming mechanism and on the dynamic mechanism of plate tectonics // Earth Science Frontiers. 2019. Vol. 26. Iss. 1. P. 337–355.
29. Zhang H.F., Harris N., Parrish R., et al. U-Pb ages of the Kudui and Sakya Pale Granites in the Sakya Dome, northern Himalayas and their geological significance // Chinese Sciences Bulletin. 2004. Vol. 49. P. 2090–2094.
30. Wu F.Y., Liu Z.C., Liu X.C., et al. Himalayan leucogranite: Petrogenesis and implications to orogenesis and plateau uplift // *Acta Petrologic Sinica*. 2015. Vol. 31. Iss. 1. P. 1–36.
31. Liu D.M., Li D.W., Yang W.R. Study of mylonite and deformation of ductile shear zone, Dingjie area // Earth Science Frontiers. 2003. Vol. 10. Iss. 2. P. 479–486.
32. Zhang J.J., Ding L., Zhong D.L., et al. Himalayan extension parallel to an orogenic belt: a sign of collapse or a product of compression uplift? // Chinese Sciences Bulletin. 1999. Vol. 44. Iss. 19. P. 2031–2036.
33. Wang C.Y., Wan J.L., Li D.M., Li Q., Qu G.S. Thermochronological evidence of tectonic uplift in Nyalam, south Tibetan detachment system // Bulletin of Mineralogy, Petrology and Geochemistry. 2001. Vol. 20. Iss. 4. P. 292–294.
34. Sorkhabi R.B., Stump E., Foland K.A., Jainc A.K. Fission-track and $^{40}\text{Ar}/^{39}\text{Ar}$ evidence for episodic denudation of the Gangotri granites in the Garhwal Higher Himalaya, India // *Tectonophysics*. 1996. Vol. 260. Iss. 1-3. P. 187–199. [https://doi.org/10.1016/0040-1951\(96\)00083-2](https://doi.org/10.1016/0040-1951(96)00083-2)
35. Burbank D.W., Blythe A.E., Putkonen J., Pratt-Sitaula B., Gabet E., Oskinet M., et al. Decoupling of erosion and precipitation in the Himalayas // *Nature*. 2003. Vol. 426. P. 652–655. <https://doi.org/10.1038/NATURE02187>
36. Liu D.M., Li D.W., Yang W.R., Wang X.F., Zhang J.Y. Evidence from fission track ages for the Tectonic uplift of the Himalayan Orogen during Late Cenozoic // *Earth Science – Journal of China University of Geosciences*. 2005. Vol. 30. Iss. 2. P. 147–152.
37. Abrahami R., van der Beek P., Huyghe P., Hardwick E., Carcaillet J. Decoupling of long-term exhumation and short-term erosion rates in the Sikkim Himalaya // *Earth and Planetary Science Letters*. 2016. Vol. 433. P. 76–88. <https://doi.org/10.1016/j.epsl.2015.10.039>
38. Zeitler P.K. Cooling history of the NW Himalaya, Pakistan // *Tectonics*. 1985. Vol. 4. Iss. 1. P. 127–151. <https://doi.org/10.1029/TC004i001p00127>
39. Burg J.P., Nievergelt P., Oberli F., Seward D., Davy P., Maurin J.C., et al. The Namche Barwa syntaxis: evidence for exhumation related to compressional crustal folding // *Journal of Asian Earth Science*. 1998. Vol. 16. Iss. 2-3. P. 239–252. [https://doi.org/10.1016/S0743-9547\(98\)00002-6](https://doi.org/10.1016/S0743-9547(98)00002-6)
40. Vannay J.C., Grasemann B., Rahn M., Frank W., Carter A., Baudraz V., et al. Miocene to Holocene exhumation of metamorphic crustal wedges in the NW Himalaya: evidence for tectonic extrusion coupled to fluvial erosion // *Tectonics*. 2004. Vol. 23. Iss. 1. P. 1–24. <https://doi.org/10.1029/2002TC001429>
41. Zhu D.G., Meng X.G., Shao Z.G., et al. The formation and evolution of Zhada basin in Tibet and the uplift of the Himalayas // *Acta Geoscientica Sinica*. 2006. Vol. 27. Iss. 3. P. 193–200.
42. Shi Y.F., Li J.J., Li B.Y. Uplift and environmental change of the Tibetan plateau during the late Cenozoic. Guangzhou: Guangdong Science and Technology Publishing House, 1998.
43. Zheisheng A., Kutzbach J.E., Prelli W.L., Porter S.C. Evolution of Asian monsoons and phased uplift of the Himalaya-Tibetan Plateau since Late Miocene times // *Nature*. 2001. Vol. 411. P. 62–66. <https://doi.org/10.1038/35075035>
44. Wang F.B., Li S.F., Shen X.H., et al. Formation and evolution of the Gyirong County Basin, environmental changes and Himalayan uplift // *Science in China. Series D*. 1996. Vol. 26. P. 329–335.
45. Shi Y.F., Li J.J., Li B.Y., Yao T.D., Wang S.M., Li S.J., et al. Uplift of the Qinghai-Xizang (Tibetan) plateau and east Asia environmental change during Late Cenozoic // *Acta Geographica Sinica*. 1999. Vol. 54. Iss. 1. P. 10–21.
46. Ding L., Zhong D.L., Pan Y.S., et al. Evidence of fission tracks that have rapidly increased since the Pliocene in the Eastern Himalayan syntaxe // *Chinese Science Bulletin*. 1995. Vol. 40. Iss. 16. P. 1479–1500.
47. Zheng Y., Zhang J., Wang J., Zhang B., Wang X., Wang M. Rapid denudation of the Himalayan orogen in the Nyalam area, southern Tibet, since the Pliocene and implications for tectonics-climate coupling // *Chinese Science Bulletin*. 2014. Vol. 59. P. 874–885. <https://doi.org/10.1007/s11434-014-0116-x>



Authorship criteria / Критерии авторства

Demin Liu, Weiran Yang, Tieying Guo, Jiangtao Ru, Aimin Xiong are the authors of the article, hold equal copyright and bear equal responsibility for plagiarism.

Лю Дэминь, Ян Вэйжань, Го Тein, Жу Цзяньтао, Сюн Айминь написали статью, имеют равные авторские права и несут одинаковую ответственность за плагиат.

Responsibility for plagiarism / Конфликт интересов

The authors declare that there is no conflict of interest regarding the publication of this article.

Авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов.

All authors have read and approved the final version of this manuscript.

Все авторы прочитали и одобрили окончательный вариант рукописи.

Information about the authors / Сведения об авторах



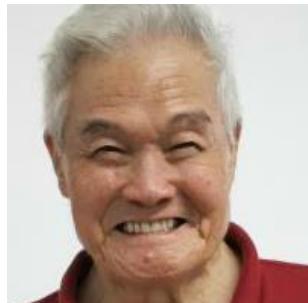
Demin Liu,
Doctor's Degree,
Associate Professor,
School of Earth Sciences,
China University of Geosciences (Wuhan),
388 Lumo Road, Wuhan 430074, China,
✉ e-mail: 5guc@163.com

Лю Дэминь,
доктор,
доцент,
Школа наук о Земле,
Китайский геологический университет (Ухань),
430074, г. Ухань, ул. Лумо Роуд, 388, Китай,
✉ e-mail: 5guc@163.com



Weiran Yang,
Bachelor's Degree,
Professor,
School of Earth Sciences and Resources,
China University of Geosciences (Beijing),
29 Xueyuan Road, Beijing 100083, China,
e-mail: weiranyang@126.com

Ян Вэйжань,
бакалавр,
профессор,
Школа наук о Земле и природных ресурсов,
Китайский геологический университет (Пекин),
100083, г. Пекин, ул. Сюеюань Роуд, 29, Китай,
e-mail: weiranyang@126.com



Tieying Guo,
Bachelor's Degree,
Professor,
School of Earth Sciences and Resources,
China University of Geosciences (Beijing),
29 Xueyuan Road, Beijing 100083, China,
e-mail: 3120687728@qq.com

Го Тein,
бакалавр,
профессор,
Школа наук о Земле и природных ресурсов,
Китайский геологический университет (Пекин),
100083, г. Пекин, ул. Сюеюань Роуд, 29, Китай,
e-mail: 3120687728@qq.com



Jiangtao Ru,
School of Earth Sciences,
China University of Geosciences (Wuhan),
388 Lumo Road, Wuhan 430074, China.

Жу Цзянтао,
Школа наук о Земле,
Китайский геологический университет (Ухань),
430074, г. Ухань, ул. Лумо Роуд, 388, Китай.

Aimin Xiong,
School of Earth Sciences,
China University of Geosciences (Wuhan),
388 Lumo Road, Wuhan 430074, China.

Сюн Айминь,
Школа наук о Земле,
Китайский геологический университет (Ухань),
430074, г. Ухань, ул. Лумо Роуд, 388, Китай.



Оригинальная статья / Original article

УДК 550.370

DOI: <http://dx.doi.org/10.21285/2686-9993-2020-43-3-325-338>



Влияние размеров установки на проявление низкочастотной дисперсии электромагнитных свойств земли в измерениях на акваториях с глубиной до 100 м

© Е.В. Агеенков^a, А.А. Ситников^b, Е.Н. Воднева^c

^aИнститут нефтегазовой геологии и геофизики им. А.А. Трофимука СО РАН, г. Новосибирск, Россия

^bООО «Сибирская геофизическая научно-производственная компания», г. Иркутск, Россия

^cЛимнологический институт СО РАН, г. Иркутск, Россия

Резюме: Цель данной работы заключалась в иллюстрации влияния размеров установки на проявление низкочастотной дисперсии электромагнитных свойств геологической среды в измерениях переходного процесса электрическими линиями в осевой области источника на акваториях с глубиной не более 100 м. В ходе исследования проанализировано изменение сигнала переходного процесса, конечной разности сигнала переходного процесса и трансформанты (отношения этих величин) в зависимости от длины источника – горизонтальной заземленной электрической линии (AB) от 50 до 2000 м, длины приемника – трехэлектродной электрической линии (MON) от 50 до 2000 м, а также расстояния между их центрами (разноса) от 100 до 4000 м. Проведено сравнение указанных величин от проводящей и проводящей поляризующейся модели для одинаковых установок, находящихся на одинаковых глубинах. Заземленная электрическая линия находится внутри проводящей среды с проводящим поляризующимся основанием. Проводящая среда ассоциируется с толщиной морской воды в шельфовых областях с глубинами моря до 100 м. Проводящее поляризующееся основание – это геологическая среда (земля), перекрытая слоем воды. Учет поляризуемости основания осуществлен введением частотно зависимого удельного электрического сопротивления посредством формулы Коула – Коула. Выполненные расчеты показывают проявление различных составляющих переходного процесса, связанных со становлением электромагнитного поля и с проявлением низкочастотной дисперсии электромагнитных свойств земли, вызванной как гальваническим, так и вихревым током. Эти составляющие по-разному проявляются на установках с разными размерами питающей и приемных линий и разноса. На основании расчетов можно утверждать: на разных по размерам установках, погруженных в водный слой, при его мощности 100 м на временном диапазоне от 1 мс до 16 с прослеживается зависимость характера сигнала от глубины погружения для «малых» установок с линией AB 50 и 100 м и отсутствие такой зависимости для остальных установок, использовавшихся при расчетах, с линией AB 250, 500, 1000 и 2000 м.

Ключевые слова: шельф, становление поля, гальванически вызванная поляризация, индукционно вызванная поляризация, переходный процесс, формула Коула – Коула, аквальная геоэлектрика

Информация о статье: поступила в редакцию 07 мая 2020 г.; поступила после рецензирования и доработки 09 июня 2020 г.; принята к публикации 05 июля 2020 г.

Для цитирования: Агеенков Е.В., Ситников А.А., Воднева Е.Н. Влияние размеров установки на проявление низкочастотной дисперсии электромагнитных свойств земли в измерениях на акваториях с глубиной до 100 м. *Науки о Земле и недропользование*. 2020. Т. 43. № 3. С. 325–338. <https://doi.org/10.21285/2686-9993-2020-43-3-325-338>

Influence of the probe dimensions on the display of the low-frequency dispersion of the earth's electromagnetic properties for measurements in marine waters up to 100 m deep

© Evgeny V. Ageenkov^a, Aleksandr A. Sitnikov^b, Elena N. Vodneva^c

^aTrofimuk Institute of Petroleum Geology and Geophysics, Siberian Branch of the Russian Academy of Sciences, Novosibirsk, Russia

^bLLC "Siberian Geophysical Research and Production Company", Irkutsk, Russia

^cLimnological Institute, Siberian Branch of the Russian Academy of Sciences, Irkutsk, Russia

Abstract: The purpose of the study is to show the effect of the probe dimensions on the display of the low-frequency dispersion of the geological formations' electromagnetic properties in transient measurements by electric lines in the axial area of the source for the water areas up to 100 m deep. The study analyzes the change in the transient signal, the finite difference, and the transform (the ratio of the above two) as a function of the length of the source (a horizontal grounded electric line (AB) 50 to 2,000 m), the receiver (a three-electrode electric line (MON) 50 to 2,000 m), and the distance



between their centers (spacing) 100 to 4,000 m. The values obtained from the conductive and conductive polarizing models are compared for the identical probes installed at the same depth. The grounded electric line is located within the conducting medium with a conductive polarizable base. The conducting medium is associated with the seawater thickness in the marine shelves up to 100 m deep. The conductive polarizable base is a geological environment (earth) covered with a layer of water. The polarizability of the base is registered by introducing frequency-dependent electrical resistivity by the Cole-Cole formula. The calculations show the display of different transient components associated with the transient buildup and the earth's low-dispersion properties caused by both galvanic and eddy currents. These components manifest themselves differently for the probes with different dimensions of the source line, receiving line, and spacing. Based on the calculations, it can be argued that in the time range from 1 ms to 16 s, at the probes that have different dimensions and are immersed in the water layer up to 100 m thick, the signal changes depending on the immersion depth for "small" installations (AB of 50 and 100 m), while there is no such dependence for the rest of the probes used in the calculations (AB of 250, 500, 1,000, and 2,000 m).

Keywords: shelf, transient electromagnetic method, galvanic induced polarization, inductive induced polarization, Cole-Cole model, aquatic electromagnetic

Information about the article: received May 07, 2020; revised June 09, 2020; accepted July 05, 2020.

For citation: Ageenkov EV, Sitnikov AA, Vodneva EN. Influence of the probe dimensions on the display of the low-frequency dispersion of the earth's electromagnetic properties for measurements in marine waters up to 100 m deep. *Nauki o Zemle i nedropol'zovanie = Earth sciences and subsoil use*. 2020;43(3):325–338. (In Russ.) <https://doi.org/10.21285/2686-9993-2020-43-3-325-338>

Введение

Значительные территории шельфа нашей страны (рис. 1) перекрыты морем глубиной до 100 м¹ [1]. Там сосредоточены полезные ископаемые, находящиеся на продолжении континентальных провинций скопления ресурсов.

Отличия морской электроразведки от наземной связаны со специфическим влиянием слоя морской воды, а электроразведочные исследования на акваториях проводятся для изучения электромагнитных свойств геологической среды, находящейся под толщей воды [2]. Поисковый интерес вызывает

изучение проводящих и поляризационных свойств геологических отложений.

Аквальная электроразведка начала развиваться в 1930-е гг. с методов постоянного тока [3]. В период с 1950-х по 1970-е гг. в Советском Союзе были разработаны основы методики и техники различных модификаций морской электроразведки с искусственными источниками тока (метод непрерывных дипольно-осевых зондирований [3], метод непрерывного профилирования, метод зондирований становлением магнитного поля, метод вызванной поляризации (ВП)), при проведении

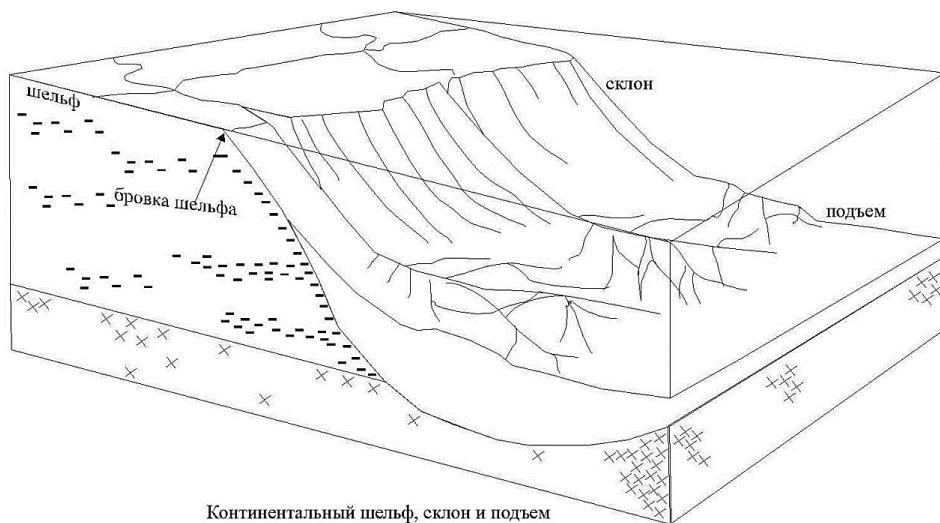


Рис. 1. Схематическое представление континентального шельфа в рельефе морского дна
Fig. 1. Schematic representation of the continental shelf in a seabed relief

¹Физическая география материков и океанов: учебник для географических специальностей университетов / под общ. ред. А.М. Рябчикова. М.: Высшая школа, 1988. 588 с.



измерений на постоянном токе также использовались установки, измерительные и питающие электроды которых размещались на дне (донные установки) [4, 5].

За рубежом был разработан и сейчас используется морской магнитометрический метод сопротивлений (англ.: *magnetometric offshore electrical sounding method*) [6, 7]. В нем применяются стационарные донные приемники, состоящие из двух-трех ортогональных датчиков магнитного поля.

В 1960–1970-е гг. в Советском Союзе на Каспийском море [8] и за рубежом стала развиваться аппаратура и методика измерений естественного электромагнитного поля Земли – морской магнитотеллурический метод с использованием донных измерительных станций. С использованием измерений этих же станций в начале 80-х гг. начали разрабатываться дистанционные частотные зондирования или геометрические частотные зондирования в узком диапазоне частот и широком диапазоне разносов с буксируемым электромагнитным источником [9–13] (англ.: *seabed logging* и *control source electromagnetic*).

С конца 1970-х и до 1990-х гг. в ПГО «Севморгеология» (г. Ленинград) интенсивно развивался морской аппаратно-методический электроразведочный комплекс зондирования становлением поля с буксируемыми линейными диполями для изучения проводимости и ВП [14–17].

С 2000 г. на базе наземного дифференциально-нормированного метода электроразведки [18, 19] под руководством П.Ю. Легейдо (ДГУП «Сибирская геофизическая научно-производственная компания», ФГУГП «Иркутск-геофизика») стала разрабатываться и использоваться его надводная модификация – аквальный дифференциально-нормированный метод электроразведки [20], а позднее, в конце 2000-х гг., – аквальный дифференциально-нормированный метод электроразведки с подводной буксируемой системой [21].

Описываемое исследование продолжает тему, поднятую в ранее изданных публикациях [22–28]. На основе численного эксперимента было показано поведение регистрируемого сигнала переходного процесса, обусловленного диффузией вихревого тока и прояв-

лением токов гальванически и индукционно вызванной поляризации (ВПГ и ВПИ). Были рассмотрены условия суши [22–25] и акватории [26].

Расчеты, сделанные для условий суши, позволили объяснить особенности поведения сигнала переходного процесса для электрической установки, находящейся на поверхности проводящей поляризующейся земли. Приведем их ниже.

1. Гальванически заземленная линия в импульсном режиме пропускания тока в проводящей земле возбуждает индуктивный переходный процесс, ВПГ и ВПИ. Во время токового импульса в поляризующейся среде протекают различные процессы разделения зарядов. После прекращения этого воздействия начинаются обратные релаксационные процессы, проявляющиеся как электромагнитный сигнал, регистрируемый измерителем совместно с электромагнитным сигналом, связанным с диффузией вихревых токов внутрь проводящей земли. Вихревые токи, распространяющиеся внутри поляризующейся среды, также индуцируют процессы разделения зарядов, которые после их ослабления, а затем и затухания становятся обратными релаксационными процессами, также проявляющимися как дополнительный электромагнитный сигнал, регистрируемый измерителем.

2. Сигнал, регистрируемый заземленной электрической линией, содержит индуктивную и поляризационную составляющую, возбуждаемую как гальваническим, так и вихревым током. В сигнале поляризационной составляющей возможно проявление нескольких релаксационных процессов различной природы. Несмотря на сложность регистрируемого сигнала, именно заземленная линия чаще используется для изучения ВП, так как плотность гальванических токов, «заряжающих» землю, выше плотности вихревых токов незаземленного источника, а время воздействия определяется продолжительностью токового импульса, а не продолжительностью переходного процесса, как для индуктивного источника.

3. Эффективная глубина, с которой регистрируется отклик земли осевой установкой, зависит от разноса – расстояния между



источником и приемником. Поэтому на близком расстоянии (на малых разносах) глубинность исследования постоянным током небольшая, а на линии, заземленной в осевой зоне источника, поляризация, вызванная вихревым током, проявляется в виде смены знака сигнала переходного процесса. При удалении приемника от источника в осевой зоне (увеличении разноса) увеличивается эффективная глубина, с которой поступает отклик постоянного тока, и на схожем временном диапазоне влияние ВПИ уменьшается.

4. Для источника заземленная линия в осевой зоне ВПИ проявляется в смене знака сигнала $\Delta U(t)$, а для трехэлектродной измерительной установки – в смене знака конечной разности сигнала переходного процесса $\Delta^2 U(t)$ и их отношения – трансформанты $P1(t)$ [18, 19].

Было подчеркнуто, что ВП возбуждается вихревым или гальваническим током, но природа сигнала ВПИ и ВПГ одинакова – электрофизические, электрохимические и электрокинетические релаксационные процессы в многофазной гетерогенной геологической среде.

Для условий акваторий [26–28] рассматривалась модель двухслойного полупространства, где первый слой – проводящая неполяризующаяся среда (морская вода), в его основании – проводящая поляризующаяся среда – земля.

В работе [26] установка, принятая для расчетов, представляла из себя источник – заземленную электрическую линию – и ряд измерителей – осевых трехэлектродных заземленных линий, удаляющихся от источника (ее можно описать следующим образом: А 1000 В 150 М₁ 150 М₂ 150 М₃ 150 М₄ 150 М₅ 150 М₆ 150 М₇ 150 М₈ 150 М₉). Расчеты переходного процесса проводились до времени 16 с для нескольких моделей с глубинами моря 100, 500 и 1000 м. Для каждой модели установка располагалась горизонтально на поверхности воды, на дне и в середине водной толщи.

Использование в исследовании многоразносной установки и моделей с разными глубинами моря позволило сделать важные выводы, а именно:

1. Сигнал на измерительных линиях претерпевает значительные изменения при

удалении от источника и при изменении толщины, отделяющей установку от поляризующейся среды, последнее происходит либо при погружении установки, либо при увеличении глубины акватории.

2. Сигнал ВП проявляется на временах измерений до 16 с при глубине моря 100, 500 и 1000 м. При расположении установки в верхней части водного слоя при мощности воды 500 и 1000 м, то есть при значительной толщине неполяризующейся толщи, сигнал ВП проявляется как ВПИ, связанная с вихревым током. При глубине моря 100 м и придонном положении установки ВП проявляется как ВПГ, то есть поляризация, связанная с гальваническим током. Однако разные способы возбуждения процессов ВП в геологической среде позволяют изучать одни и те же геоэлектрические (поляризационные) характеристики.

Вместе с тем исследование показало, что необходимо углубленное изучение изменений сигнала переходного процесса для каждой глубины моря при разных условиях измерений (геометрии установки, формы импульсного воздействия и продолжительности регистрации сигнала).

В работах [27, 28] численно исследовалось проявление низкочастотной дисперсии геологической среды (сигнала ВП) на акватории с глубиной моря 100 м для установки А 500 В 500 М 500 О 500 Н, находящейся на разных глубинах от 0 до 100 м, а также при разной продолжительности возбуждающего импульса и времени измерения переходного процесса.

Различие проявления электромагнитных сигналов разного происхождения (становления, ВПГ и ВПИ) связано с изменением распределения внутри исследуемой среды плотности токов, с которыми связаны эти сигналы, во время протекания переходного процесса. Эти различия видны в рассчитываемых величинах: сигнале переходного процесса $\Delta U(t)$, конечной разности сигнала переходного процесса $\Delta^2 U(t)$ и трансформанте $P1(t)$. Для разных по геометрическим характеристикам установок переходный процесс будет протекать по-разному. Цель этого и предыдущих исследований – показать, от каких характеристик



системы измерений (геометрия установки, продолжительность импульса и время измерения переходного процесса) зависит проявление в общем сигнале переходного процесса сигнала, связанного с низкочастотной дисперсией электромагнитных свойств геологических образований, а также использовать результаты исследований при практических измерениях на акваториях.

Материалы и методы исследования

В основе исследования лежат результаты решения прямой задачи от одномерной проводящей поляризующейся среды для горизонтальной электрической компоненты неустановившегося электромагнитного поля. Авторами использовался метод линейной фильтрации решения задачи электромагнитного становления [17]. При расчетах первоначально вычислялась частотная характеристика сигнала в широком диапазоне частот, затем путем преобразования Фурье получалось решение во временной области. ВП среды учитывалась частотно зависимым удельным электрическим сопротивлением (УЭС) по формуле Коула – Коула (1)²:

$$\rho(\omega) = \rho_0 \left(1 - \frac{\eta(i\omega\tau)^c}{1 + (i\omega\tau)^c} \right), \quad (1)$$

где ρ_0 – УЭС на постоянном токе, Ом·м; η – коэффициент поляризуемости, доли ед.; τ – постоянная времени, с; c – показатель степени, б.р.; ω – круговая частота, с⁻¹.

Для численного эксперимента была выбрана простая среда – двухслойное полупространство. Водный слой хорошо проводящий,

с УЭС 0,25 Ом·м, неполяризующийся. Проводящая геологическая среда – с УЭС 1,5 Ом·м, свойственным морским осадкам. Поляризуемость геологической среды изменялась и была задана 0 или 15 %. Мощность воды составляла 100 м (табл. 1 и 2).

Расчеты сигнала переходного процесса $\Delta U(t)$, конечной разности сигнала переходного процесса $\Delta^2 U(t)$ и трансформанты $P1(t)$ проведены для ряда установок (рис. 2): АВ – 50 м, МО – 25 м, ОН – 25 м, расстояние между центрами источника и измерительной линии МН r – 100 м; АВ – 100 м, МО – 50 м, ОН – 50 м, r – 200 м; АВ – 250 м, МО – 150 м, ОН – 125 м, r – 500 м; АВ – 500 м, МО – 250 м, ОН – 250 м, r – 1000 м; АВ – 1000 м, МО – 500 м, ОН – 500 м, r – 2000 м; АВ – 2000 м, МО – 1000 м, ОН – 1000 м, r – 1000 м. Расчеты величин $\Delta U(t)$, $\Delta^2 U(t)$ и $P1(t)$ проведены при различных глубинах расположения источника и приемника. Установка размещалась горизонтально на глубинах 0, 50 и 100 м.

Переходный процесс на интервале времен от 1 мс до 16 с рассчитывался после бесконечного импульса тока (импульс возбуждения – функция Хевисайта).

Результаты исследования и их обсуждение

Для наглядного пояснения поведения электромагнитного поля, созданного различными по размерам источниками, и сигнала переходного процесса, регистрируемого разными установками, рассмотрим графики сигнала переходного процесса $\Delta U(t)$, конечной разности

Таблица 1. Модель проводящей среды

Table 1. Model of the conducting medium

Слой	Удельное электрическое сопротивление ρ , Ом·м	Коэффициент поляризуемости η , %	Мощность слоя h , м
1	0,25	0	100
2	1,5	0	∞

Таблица 2. Модель проводящей среды с поляризующимся основанием

Table 2. Model of the conducting medium with a polarizable base

Слой	Удельное электрическое сопротивление ρ , Ом·м	Коэффициент поляризуемости η , %	Постоянная времени τ , с	Показатель степени c , б.р.	Мощность слоя h , м
1	0,25	0	–	–	100
2	1,5	15	1	0,5	∞

² Могилатов В.С. Импульсная электроразведка учеб. пособие. Новосибирск: Изд-во НГУ, 2014. 182 с.

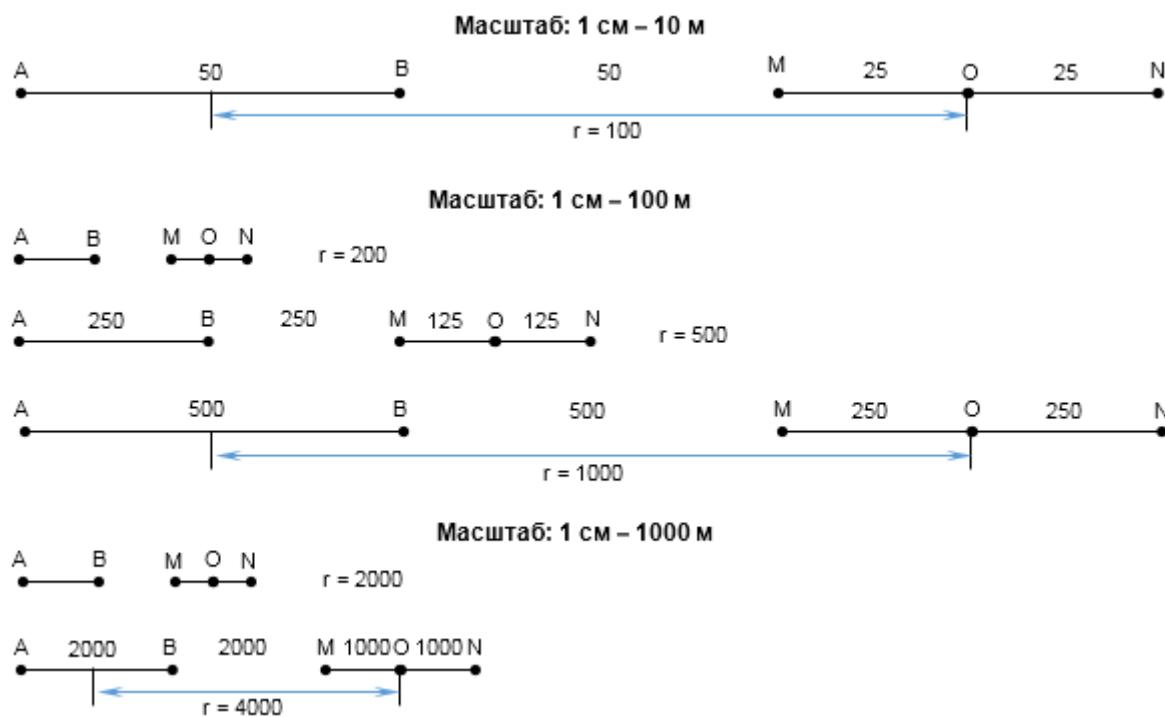


Рис. 2. Схемы электрических установок, использовавшихся при расчетах
Fig. 2. Diagrams of electrical probes used in the calculations

сигнала переходного процесса $\Delta^2 U(t)$, трансформанты $P1(t)$ и разности трансформант $\Delta P1(t)$ для установок, находящихся на поверхности водной толщи, в ее середине и на дне акватории.

Величина $\Delta P1(t)$ (2) показывает разность трансформант $P1(t)$ во время переходного процесса для проводящей модели и для проводящей поляризующейся модели, рассчитанных для одинаковых условий:

$$\Delta P1(t) = P1_{0\%}(t) - P1_{15\%}(t), \quad (2)$$

где $P1_{0\%}(t)$ – сигнал трансформант $P1(t)$ во время переходного процесса для проводящей модели; $P1_{15\%}(t)$ – сигнал трансформант $P1(t)$ во время переходного процесса для проводящей поляризующейся модели.

Описание результатов исследования начнем с расчетов для установок, расположенных в середине водного слоя – на глубине 50 м.

Различие поведения сигнала переходного процесса для использованных установок можно объяснить, опираясь на оценку эффективной глубины проникновения постоянного тока в проводящей среде. Она изменяется с 1/4 до 1/10 длины источника³, и для сильно

проводящих сред (каковой является морская вода) эта величина приближается к меньшим значениям. В морской воде основная плотность гальванического тока сосредоточена вокруг источника в форме, напоминающей эллипсоид вращения с малым радиусом, примерно равным 1/10 длины питающей линии.

При глубине моря 100 м источники длиной 2000 и 1000 м во время пропускания тока создают вокруг себя область основной плотности гальванического тока с максимальным радиусом в центральной части линии – порядка 200 и 100 м соответственно. Гальванический ток высокой плотности будет течь не только в воде, но и в геологической среде, вызывая процессы разделения зарядов. После выключения импульса распределение электромагнитного поля, созданное в стационарном состоянии, некоторое время будет поддерживаться благодаря явлению самоиндукции. После ослабления магнитного поля, противодействующего изменениям, начнется интенсивный процесс становления поля (рис. 3, a, b), сопровождающийся электромагнитным сигналом, релаксация геологической среды будет также сопровождаться электромагнитным

³Матвеев Б.К. Электроразведка: учебник для студентов. М.: Недра, 1990. 368 с.



сигналом ВПГ. До времени нескольких секунд общий сигнал переходного процесса будет главным образом определяться сигналом становления, затем – сигналом ВПГ. Изменение превалирования одной составляющей переходного процесса над другой отмечается в минимуме трансформанты $P1(t)$ (рис. 3, с). Главным образом оно связано с изменением пространственной неоднородности токов и переходом от пространственной неоднородности, определяемой вихревым током, к пространственной неоднородности, определяемой током ВПГ.

Для установок с источником длиной 500 и 250 м переходный процесс проходит схожие стадии, время перехода, когда пространственное распределение токов в среде начинает определяться токами ВПГ, отмечается ранее 1 с.

Для установки с длиной источника 100 м отмечается отличие сигнала $\Delta^2U(t)$ от аналогичных сигналов на больших установках. На времени около 200 мс отмечается смена знака сигнала (см. рис. 3, б), что отражается в смене знака трансформанты $P1(t)$ (см. рис. 3, с).

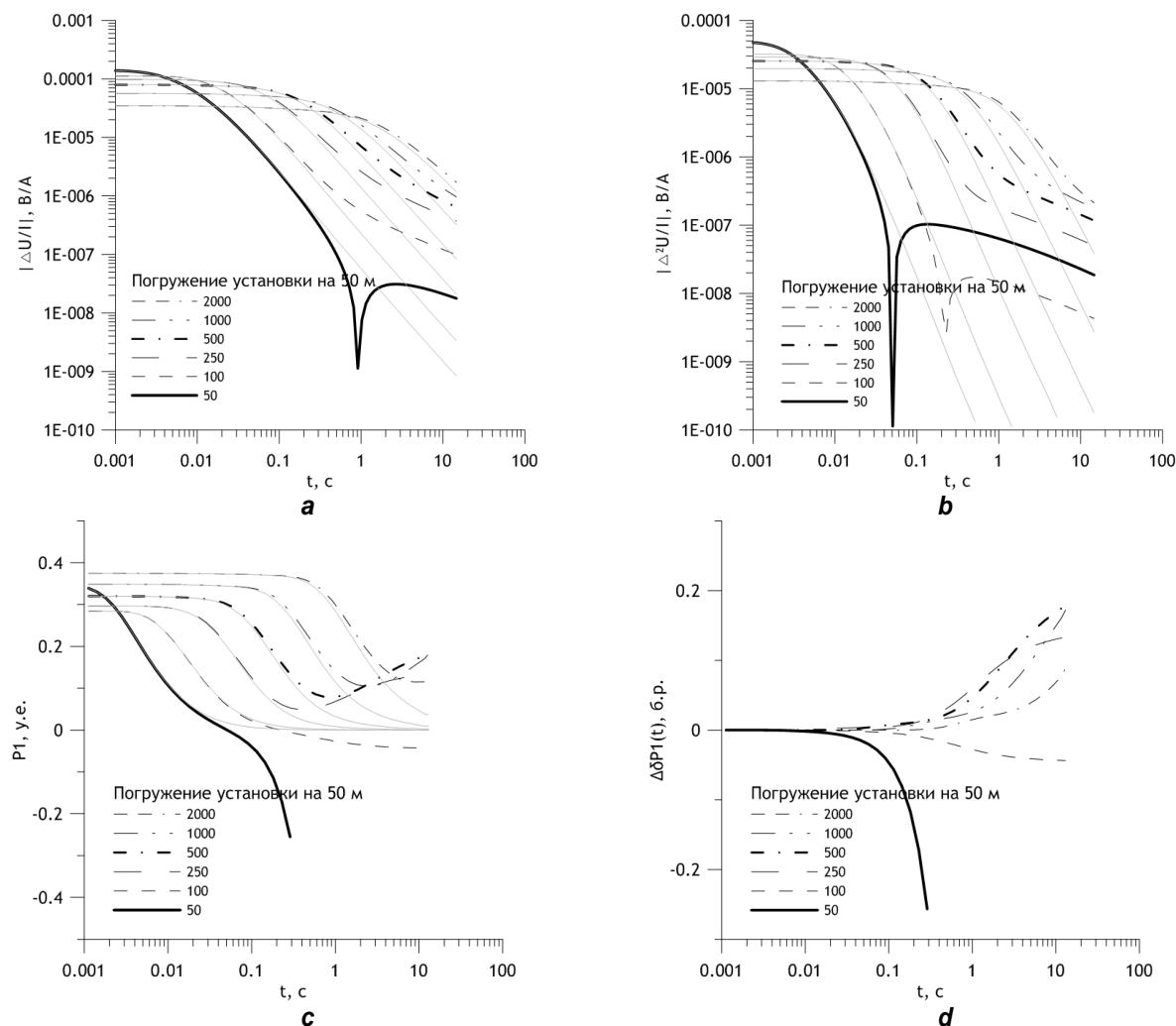


Рис. 3. Расчеты для установок, находящихся в середине водной толщи при глубине моря 100 м, для проводящей модели с проводящим поляризующимся основанием:
(тонкими серыми линиями показаны сигналы для проводящей модели):

а – сигнал переходного процесса $\Delta U(t)$; б – конечная разность сигнала переходного процесса $\Delta^2U(t)$;
с – трансформанта $P1(t)$; д – разность трансформанта $\Delta\Delta P1(t)$

Fig. 3. Calculations for the probes submerged at a depth of 50 m, with the water layer thickness of 100 m, for the conductive model with a conductive polarizable base
(thin gray lines show the signals for the conductive model):
а – transient signals $\Delta U(t)$; б – transient difference signals $\Delta^2U(t)$;
с – transform $P1(t)$; д – transform difference $\Delta\Delta P1(t)$



Интересно изменение сигнала переходного процесса для установки А 50 В 50 М 25 О 25 Н: сигнал переходного процесса $\Delta U(t)$ изменяет свою полярность на времени 1 с (см. рис. 3, а). Такого эффекта не отмечается для других установок на временном интервале до 16 с. Еще на более раннем времени меняется знак $\Delta^2 U(t)$ – порядка 70 мс (см. рис. 3, б).

Для установки с длиной источника 50 м эффективная глубина проникновения постоянного тока в сильно проводящей среде – около 5 м, поэтому источник такой длины не создает значительную плотность гальванического тока в геологической среде. Во время переходного процесса основная плотность вихревого тока диффундирует сначала в водной толще, а затем в геологической среде. В последней возникает ВП, связанная не с гальваническим, а с вихревым током, которая проявляется на измерителе как электромагнитный сигнал противоположного знака. Регистрацию сигнала ВПИ, имеющего противоположную относительно знака сигнала импульса полярность, отмечают при работе с индуктивными установками. Присутствие смены знака на больших установках при глубине моря около 1000 м отмечалось в измерениях аквальным дифференциально-нормированным методом электроразведки.

На основании графиков $P1(t)$ (см. рис. 3, с) и $\Delta P1(t)$ (рис. 3, д) также можно предположить, что для геоэлектрических условий, принятых в расчетах, в сигнале, регистрируемом установкой А 100 В 100 М 50 О 50 Н, появление ВПГ и ВПИ компенсируют друг друга, то есть сигналы, связанные с токами ВПГ и ВПИ, маскируют друг друга и сигнал ВП становится завуалированным. При изменениях геоэлектрических условий или глубины моря ситуация может измениться и привести к неправильной интерпретации результатов измерений. Условно можно сказать, что для данных геоэлектрических условий применение такой установки нецелесообразно.

Вид сигналов для установок, расположенных на поверхности моря (рис. 4), во многом повторяет расчеты для установок, погруженных в середину водной толщи. Можно отметить, что смена знака $\Delta U(t)$ для установки с АВ 50 м происходит на более ранних временах –

с 1 с перемещается на 300 мс. Возрастает и амплитуда отрицательных значений. Для $\Delta^2 U(t)$ такие изменения не происходят. Такие изменения проявляются в трансформанте $P1(t)$ в присутствии точки разрыва графика (см. рис. 4, с). Увеличивается амплитуда отрицательных значений $\Delta^2 U(t)$ для установки с АВ 100 м, что проявляется в $P1(t)$ в виде резко возрастающих отрицательных значений.

Расчеты, сделанные для установок, расположенных на дне акватории – на глубине 100 м (рис. 5), показывают, что при заглублении установки в придонную часть гальванический ток проникает в геологическую среду для всех установок (из рассмотренных). В сигнале переходного процесса присутствует сигнал индуктивного становления и сигнал ВПГ. Сигнал ВПИ в рассматриваемом диапазоне времени не отмечается ни на одной установке.

Сравнение различных сигналов $\Delta P1(t)$ для разных установок и разных глубин их погружения дает информацию о вкладе в трансформант $P1(t)$ составляющей, связанной с ВП геологической среды. ВП любой природы, возникающей под воздействием гальванического или вихревого тока или этих токов совместно. При преобладании в сигнале ВПИ эта величина будет отрицательной (см. рис. 3, д и 4, д), при преобладании ВПГ – положительной (см. рис. 5, д).

Заключение

Расчеты сигналов переходного процесса $\Delta U(t)$, конечной разности сигнала переходного процесса $\Delta^2 U(t)$ и трансформанты $P1(t)$ на разных по размерам установках, погруженных в водный слой при его мощности 100 м, показали сильную зависимость характера сигнала от глубины погружения для «малых» установок (с АВ 50 и 100 м) и отсутствие такой зависимости для прочих установок (с АВ 250, 500, 1000 и 2000 м).

Сигнал переходного процесса связан с вихревым током, током ВПГ и ВПИ, и эти сигналы по-разному проявляются на измерительных линиях, размещенных в осевой области заземленной электрической линии. Зная это, можно предположить, что различия в регистрируемом сигнале во многом объясняются эффективной глубиной проникновения гальванического тока во время импульса.

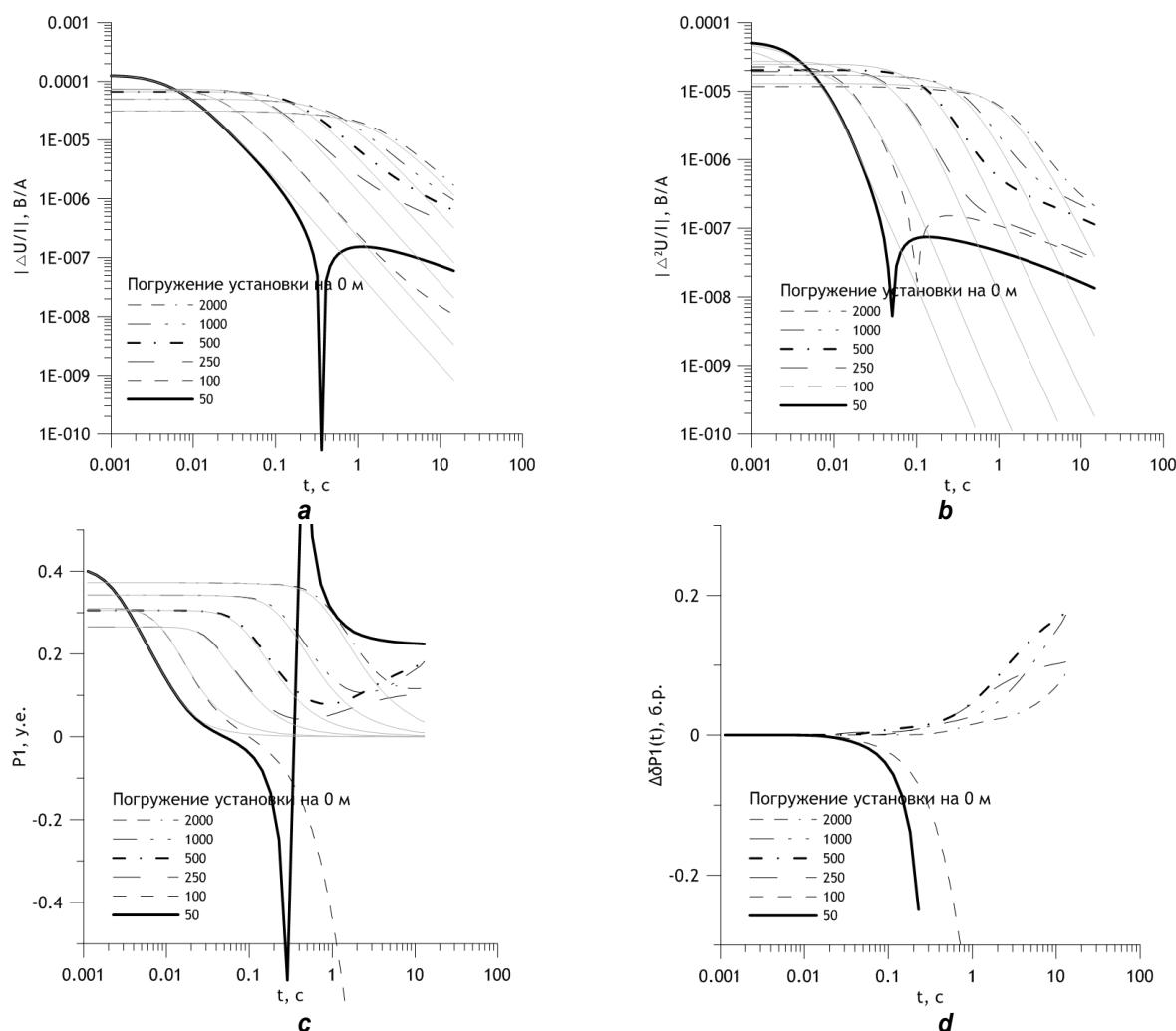


Рис. 4. Расчеты для установок, находящихся на поверхности водной толщи при глубине моря 100 м, для проводящей модели с проводящим поляризующимся основанием (тонкими серыми линиями показаны сигналы для проводящей модели):

a – сигнал переходного процесса $\Delta U(t)$; b – конечная разность сигнала переходного процесса $\Delta^2 U(t)$;

c – трансформант $P1(t)$; d – разность трансформант $\Delta\delta P1(t)$

Fig. 4. Calculations for the probes submerged at a depth of 0 m,

with the water layer thickness of 100 m, for the conductive model with a conductive polarizable base (thin gray lines show the signals for the conductive model):

a – transient signals $\Delta U(t)$; b – transient difference signals $\Delta^2 U(t)$;

c – transform $P1(t)$; d – transform difference $\Delta\delta P1(t)$

На установке А 50 В 50 М 25 О 25 Н в зависимости от глубины погружения регистрируется сигнал ВП, связанный с ВПИ (для глубин 0 и 50 м) и с ВПГ (для донной установки). Схожая ситуация наблюдается для установки А 100 В 100 М 50 О 50 Н. Можно предположить, что для этих установок на определенной глубине погружения составляющие сигнала ВП, связанные с гальваническим и вихревым током, будут компенсировать друг друга. Такие глубины можно назвать неоптимальными для изучения поляризационных свойств геологи-

ческой среды в рассматриваемых геоэлектрических условиях. Для установки с АВ 100 м взаимная компенсация сигналов ВПГ и ВПИ наблюдается для глубин, близких к 50 м.

Для оставшихся из рассматриваемых установок сигнал ВПГ преобладает над сигналом ВПИ для любой глубины погружения от поверхности водного слоя до дна. Различие сигналов, регистрируемых этими установками, заключается во времени проявления сигнала ВПГ. При увеличении размеров установки (главным образом разноса) время, когда

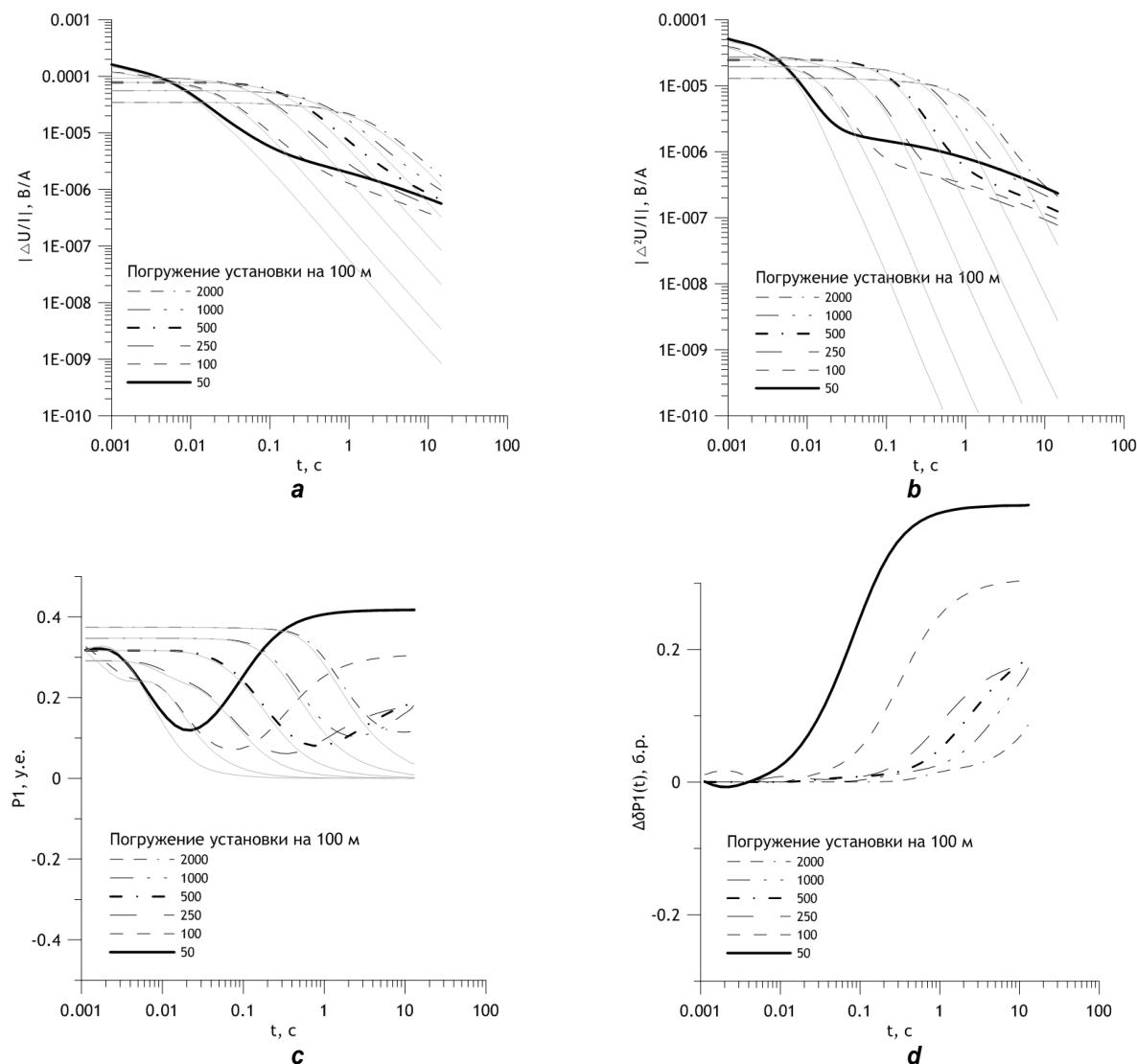


Рис. 5. Расчеты для установок, находящихся на дне акватории при глубине моря 100 м, для проводящей модели с проводящим поляризующимся основанием (тонкими серыми линиями показаны сигналы для проводящей модели):

a – сигнал переходного процесса $\Delta U(t)$; b – конечная разность сигнала переходного процесса $\Delta^2 U(t)$;

c – трансформант $P1(t)$; d – разность трансформант $\Delta\delta P1(t)$

Fig. 5. Calculations for the probes submerged at a depth of 100 m, with the water layer thickness 100 m, for the conductive model with a conductive polarizable base (thin gray lines show the signals for the conductive model):

a – transient signals $\Delta U(t)$; b – transient difference signals $\Delta^2 U(t)$;

c – transform $P1(t)$; d – transform difference $\Delta\delta P1(t)$

сигнал становления становится по амплитуде меньше сигнала ВПГ, сдвигается на более позднее. Этот момент показывает присутствие минимума на трансформанте $P1(t)$ перед началом восходящей ветви этой трансформанты. Для установки А 250 В 250 М 125 О 125 Н это время – 300 мс, для установки А 500 В 500 М 250 О 250 Н – 1 с, для установки А 1000 В 1000 М 500 О 500 Н – 3 с, для установки А 2000 В 2000 М 1000 О 1000 Н – 10 с.

Во время импульса тока в окружающих источниках средах устанавливается стационарное поле постоянного тока. После выключения тока установившееся распределение электромагнитного поля в течение некоторого времени поддерживается магнитным полем самоиндукции, а затем в проводящей среде начинается переходный процесс. По мере удаления от источника и величины проводимости среды стационарное состояние сменяется



переходным процессом с задержкой: чем дальше от источника, тем позднее, чем среда более проводящая, тем позднее. Это можно наблюдать по продолжительности асимптотической ветви на графиках $\Delta U(t)$, $\Delta^2 U(t)$ и $P1(t)$, начинающейся с ранних времен и длившейся до начала изменений сигналов, связанных с началом переходного процесса. Во время него первоначально большую амплитуду имеет сигнал, связанный с диффузией вихревого тока внутри проводящей среды, затем большую амплитуду приобретает сигнал, связанный с гальваническим или вихревым током.

Сделанные расчеты показали, что для «больших» установок (с АВ 1000 и 2000 м и разносом 2000 и 4000 м) диапазон преобладания сигнала ВПГ – самые поздние времена от 3 до 16 с и от 10 до 16 с. Он ограничен про-

должительным эффектом самоиндукции магнитного поля, поддерживающим распределение электромагнитного поля, в том числе в области измерителя, сложившееся в стационарном состоянии. Для этих установок такая ситуация наблюдается при любой глубине погружения от 0 до 100 м. Однако при уменьшении разноса время преобладания сигнала ВПГ смещается на более ранние значения [23, 25, 26], а изучение таких установок потребует дополнительного численного исследования.

Установки с АВ 250 и 500 м можно считать оптимальными для данных геоэлектрических условий в такой постановке задачи, так как время преобладания сигнала ВПГ начинается относительно рано – с 300 мс или с 1 с. К тому же это не зависит от глубины погружения установки, как для меньших по размеру установок.

Библиографический список

1. Леонтьев О.К. Дно океана. М.: Мысль, 1968. 320 с.
2. Маловицкий Я.П., Гагельганц А.А., Коган Л.И. [и др.]. Морские геофизические исследования. М.: Недра, 1977. 375 с.
3. Пат. № 150184, СССР, МПК G01V3/02. Устройство для морской электроразведки / О.В. Назаренко. Заявл. 13.11.1961; опубл. 01.01.1962. Бюл. № 18.
4. Ваньян Л.Л. О теоретических кривых морского электрического зондирования донной установкой // Прикладная геофизика: сб. ст. Вып. 15. М.: Гостоптехиздат, 1956. С. 83–90.
5. Терёхин Е.И. Теоретические основы электрического зондирования с установкой, погруженной в воду // Прикладная геофизика: сб. ст. Вып. 18. М.: Гостоптехиздат, 1958. С. 78–102.
6. Edwards R.N., Law L.K., Wolfgram P.A., Nobes D.C., Bone M.N., Trigg D.F., et al. First results of the MOSES experiment: sea sediment conductivity and thickness determination, Bute Inlet, British Columbia, by magnetometric offshore electrical sounding // Geophysics. 1985. Vol. 50. Iss. 1. P. 153–161. <https://doi.org/10.1190/1.1441825>
7. Edwards R.N., Nabighian M.N. The magnetometric resistivity method // Electromagnetic methods in applied geophysics. Vol. 2, Application, Parts A and B. Oklahoma: Society of Exploration Geophysicists, 1991. P. 47–104.
8. Сочельников В.В. Основы теории естественного электромагнитного поля в море. Л.: Гидрометеоиздат, 1979. 216 с.
9. Chave A.D., Constable S.C., Edwards R.N. Electrical exploration methods for the seafloor // Electromagnetic methods in applied geophysics. Vol. 2, Application, Parts A and B. Oklahoma: Society of Exploration Geophysicists, 1991. P. 931–966.
10. Constable S., Srnka L.J. An introduction to marine controlled-source electromagnetic methods for hydrocarbon exploration // Geophysics. 2007. Vol. 72. Iss. 2. P. WA3–WA12. <https://doi.org/10.1190/1.2432483>
11. Eidesmo T., Ellingsrud S., Macgregor L.M., Constable S., Sinha M.C., Johansen S.E., et al. Sea bed logging (SBL), a new method for remote and direct identification of hydrocarbon filled layers in deepwater areas // First Break. 2002. Vol. 20. Iss. 3. P. 144–152.
12. Могилатов В.С. Эффективная электроразведка в море: CSEM и другие методы // Геофизика. 2015. № 6. С. 38–42.
13. Sainson S. Electromagnetic seabed logging. Cham: Springer International Publishing, 2017. 549 p.
14. Вишняков А.Э., Паняев В.П., Яневич М.Ю., Бородский М.М. Методика, технология и аппаратура морских электроразведочных работ при прямых поисках нефти и газа // Аппаратура для исследования геомагнитного поля. М.: Изд-во ИЗМИРАН, 1983. С. 110–117.
15. Вишняков А.Э., Лисицын Е.Д., Яневич М.Ю. Влияние временных параметров вызванной поляризации залежей углеводородов на переходные процессы электромагнитного поля // Техника и методика геофизических исследований Мирового океана: сб. науч. тр. Л.: Севморгеология, 1988. С. 124–132.
16. Вишняков А.Э., Каминский В.Д., Лисицын Е.Д., Пискарев А.Л., Савченко Н.В., Черкашёв Г.А. [и др.]. Детальное картирование глубоководных донных осадков буксируемым геофизическим комплексом // Доклады Академии наук. 1992. Т. 324. № 1. С. 77–80.
17. Петров А.А. Возможности метода становления электрического поля при поисках углеводородов в шельфовых зонах // Геофизика. 2000. № 5. С. 21–26.



18. Легейдо П.Ю., Мандельбаум М.М., Рыхлинский Н.И. Дифференциально-нормированный метод электроразведки при прямых поисках залежей углеводородов // Геофизика. 1995. № 4. С. 42–45.
19. Легейдо П.Ю., Мандельбаум М.М., Рыхлинский Н.И. Информативность дифференциальных методов электроразведки при изучении поляризующихся сред // Геофизика. 1997. № 3. С. 49–56.
20. Veeken P.C.H., Legeydo P.J., Davidenko Yu.A., Kudryavceva E.O., Ivanov S.A., Chuvaev A. Benefits of the induced polarization geoelectric method to hydrocarbon exploration // Geophysics. 2009. Vol. 74. Iss. 2. P. B47–B59. <https://doi.org/10.1190/1.3184802>
21. Жуган П.П., Ситников А.А., Агеенков Е.В., Иванов С.А., Мальцев С.Х. Аппаратура, устройства и системы наблюдений для решения нефтегазопоисковых и инженерногеологических задач на акваториях электроразведочными методами ДНМЭ и НДЭМЗ // Приборы и системы разведочной геофизики. 2017. Т. 60. № 2. С. 42–49.
22. Агеенков Е.В., Ситников А.А., Пестрев И.Ю. Проявление разных типов вызванной поляризации в электромагнитных измерениях заземленной линией // Геофизика. 2018. № 2. С. 37–43.
23. Агеенков Е.В., Ситников А.А., Пестрев И.Ю., Попков А.В. О проявлении процессов индукционного становления и вызванной поляризации при работе с осевой и симметричной электрическими установками // Геология и геофизика. 2020. Т. 61. № 7. С. 976–991. <https://doi.org/10.15372/GiG2019151>
24. Агеенков Е.В., Ситников А.А., Пестрев И.Ю., Владимиров В.В. Электрическое поле на поверхности проводящей поляризующейся среды при использовании симметричных и экваториальных установок // Вестник Воронежского государственного университета. Серия: Геология. 2019. № 2. С. 93–99.
25. Агеенков Е.В., Ситников А.А., Пестрев И.Ю., Попков А.В., Воднева Е.Н. Переходный процесс на заземленных линиях над поляризующейся землей // Ученые записки Крымского федерального университета имени В.И. Вернадского. География. Геология. 2019. Т. 5. № 3. С. 288–305.
26. Агеенков Е.В., Ситников А.А., Пестрев И.Ю., Попков А.В., Воднева Е.Н. Переходный процесс на заземленных линиях, помещенных в водный слой над поляризующейся землей // Ученые записки Крымского федерального университета имени В.И. Вернадского. География. Геология. 2019. Т. 5. № 2. С. 332–348.
27. Воднева Е.Н., Агеенков Е.В., Ситников А.А. Проявление низкочастотной дисперсии электромагнитных свойств земли в измерениях переходного процесса на морских акваториях глубиной до 100 м // Науки о Земле и недропользование. 2019. Т. 42. № 4. С. 461–475. <https://doi.org/10.21285/2686-9993-2019-42-4-461-475>
28. Агеенков Е.В., Воднева Е.Н., Ситников А.А. Влияние продолжительности импульса и времени измерения переходного процесса на проявление низкочастотной дисперсии электромагнитных свойств земли в измерениях на акваториях с глубиной до 100 м // Науки о Земле и недропользование. 2020. Т. 43. № 1. С. 49–58. <https://doi.org/10.21285/2686-9993-2020-43-1-49-58>

References

1. Leont'ev OK. *Ocean Bed*. Moscow: Mysl'; 1968. 320 p. (In Russ.)
2. Malovitskii YaP, Gagel'gants AA, Kogan LI, et al. *Marine geophysical survey*. Moscow: Nedra; 1977. 375 p. (In Russ.)
3. Nazarenko OV. *Installation for marine electrical exploration*. Patent USSR, no. 150184; 1962. (In Russ.)
4. Van'yan LL. On theoretical curves of marine electrical exploration using a seabed installation. In: *Prikladnaya geofizika = Applied geophysics*. Iss. 15. Moscow: Gostoptekhizdat; 1956. p.83–90. (In Russ.)
5. Terekhin EI. Theoretical foundations of electrical sounding with a submersible installation. In: *Prikladnaya geofizika = Applied geophysics*. Iss. 18. Moscow: Gostoptekhizdat; 1958. p.78–102. (In Russ.)
6. Edwards RN, Law LK, Wolfgram PA, Nobes DC, Bone MN, Trigg DF, et al. First results of the MOSES experiment: sea sediment conductivity and thickness determination, Bute Inlet, British Columbia, by magnetometric offshore electrical sounding. *Geophysics*. 1985;50(1):153–161. <https://doi.org/10.1190/1.1441825>
7. Edwards RN, Nabighian MN. The magnetometric resistivity method. In: *Electromagnetic methods in applied geophysics*. Vol. 2, Application, Parts A and B. Oklahoma: Society of Exploration Geophysicists; 1991. p.47–104.
8. Sochel'nikov VV. *Fundamentals of the theory of natural electromagnetic fields in the sea*. Leningrad: Gidrometeoizdat; 1979. 216 p. (In Russ.)
9. Chave AD, Constable SC, Edwards RN. Electrical exploration methods for the seafloor. In: *Electromagnetic methods in applied geophysics*. Vol. 2, Application, Parts A and B. Oklahoma: Society of Exploration Geophysicists; 1991. p.931–966.
10. Constable S, Srnka LJ. An introduction to marine controlled-source electromagnetic methods for hydrocarbon exploration. *Geophysics*. 2007;72(2):WA3–WA12. <https://doi.org/10.1190/1.2432483>
11. Eidesmo T, Ellingsrud S, Macgregor LM, Constable S, Sinha MC, Johansen SE, et al. Sea bed logging (SBL), a new method for remote and direct identification of hydrocarbon filled layers in deepwater areas. *First Break*. 2002;20(3):144–152.
12. Mogilatov VS. Effective electrical prospecting in the sea: CSEM and other methods. *Geofizika = Russian Geophysics*. 2015;6:38–42. (In Russ.)
13. Sainson S. *Electromagnetic seabed logging*. Cham: Springer International Publishing; 2017. 549 p.
14. Vishnyakov AE, Panyaev VP, Yanevich MYu, Bogorodskii MM. Methods, technology and equipment for offshore electrical exploration in direct search for oil and gas. In: *Apparatura dlya issledovaniya geomagnitnogo polya = Instrumentation for exploring the geomagnetic field*.



Moscow: Pushkov Institute of Terrestrial Magnetism, Ionosphere and Radiowave Propagation, RAS; 1983. p.110–117. (In Russ.)

15. Vishnyakov AE, Lisitsyn ED, Yanevich MYu. Influence of IP time parameters of hydrocarbon deposits on the transient processes of the electromagnetic field. In: *Tekhnika i metodika geofizicheskikh issledovanii Mirovogo okeana = Technique and methodology of geophysical exploration of the World Ocean*. Leningrad: Sevmor-geologiya; 1988. p.124–132. (In Russ.)

16. Vishnyakov AE, Kaminskii VD, Lisitsyn ED, Piskarev AL, Savchenko NV, Cherkashev GA., et al. Detailed mapping of deep-water sediments with a towed geophysical complex. *Doklady Akademii nauk*. 1992;324(1):77–80. (In Russ.)

17. Petrov AA. TEM potential in the exploration for hydrocarbons in shelf zones. *Geofizika = Russian Geophysics*. 2000;5:21–26. (In Russ.)

18. Legeido PYu, Mandel'baum MM, Rykhlinskii NI. Differential-normalized electrical survey in direct HC exploration. *Geofizika = Russian Geophysics*. 1995;4:42–45. (In Russ.)

19. Legeido PYu, Mandel'baum MM, Rykhlinskii NI. Self-descriptiveness of differential methods of electrical survey in the exploration of polarizable media. *Geofizika = Russian Geophysics*. 1997;3:49–56. (In Russ.)

20. Veeken PCH, Legeido PJ, Davidenko YuA, Kudryavceva EO, Ivanov SA, Chuvaev A. Benefits of the induced polarization geoelectric method to hydrocarbon exploration. *Geophysics*. 2009;74(2):B47–B59. <https://doi.org/10.1190/1.3184802>

21. Zhugan PP, Sitnikov AA, Ageenkov EV, Ivanov SA, Maltcev CKh. Equipment, devices and surveying systems to solve the problems of oil and gas exploration and engineering geology in water areas with application of DNME and NDEMS electrical prospecting methods. *Pribory i sistemy razvedochnoi geofiziki = Devices and systems of Exploration Geophysics*. 2017;60(2):42–49. (In Russ.)

22. Ageenkov EV, Sitnikov AA, Pesterev IY. Display of induce polarization different types in electromagnetic

measurements by the line. *Geofizika = Russian Geophysics*. 2018;2:37–43. (In Russ.)

23. Ageenkov EV, Sitnikov AA, Pestrev IY, Popkov AV. On the display of the induction transient and induced polarization processes when using the axial and symmetrical electrical installations. *Geologiya i geofizika*. 2020;61(7):976–991. (In Russ.) <https://doi.org/10.15372/GiG2019151>

24. Ageenkov EV, Sitnikov AA, Pestrev IY, Vladimirov VV. Electrical field on the surface of conductive polarizable medium on venner and equatorial arrays. *Vestnik Voronezhskogo gosudarstvennogo universiteta. Seriya: Geologiya = Proceedings of Voronezh State University. Geology*. 2019;2:93–99. (In Russ.)

25. Ageenkov EV, Sitnikov AA, Pesterev IY, Popkov AV, Vodneva EN. Transient process on the grounded lines above the surface of the polarizable earth. *Uchenye zapiski Krymskogo federal'nogo universiteta imeni V.I. Vernadskogo. Geografiya. Geologiya*. 2019;5(3):288–305. (In Russ.)

26. Ageenkov EV, Sitnikov AA, Pesterev IY, Popkov AV, Vodneva EN. Transient process on electrical lines into water layer under conductive polarizable earth. *Uchenye zapiski Krymskogo federal'nogo universiteta imeni V.I. Vernadskogo. Geografiya. Geologiya*. 2019;5(2):332–348. (In Russ.)

27. Vodneva EN, Ageenkov EV, Sitnikov AA. Manifestation of the low-frequency dispersion of the earth electromagnetic properties in transient measurements for marine waters up to 100 m deep. *Nauki o Zemle i nedropol'zovanie = Earth sciences and subsoil use*. 2019;42(4):461–475. (In Russ.) <https://doi.org/10.21285/2686-9993-2019-42-4-461-475>

28. Ageenkov EV, Vodneva EN, Sitnikov AA. Influence of the pulse duration and transient measurement time on the display of the low-frequency dispersion of the earth's electromagnetic properties for marine waters up to 100 m deep. *Nauki o Zemle i nedropol'zovanie = Earth sciences and subsoil use*. 2020;43(1):49–58. (In Russ.) <https://doi.org/10.21285/2686-9993-2020-43-1-49-58>

Критерии авторства / Authorship criteria

Агеенков Е.В., Ситников А.А., Воднева Е.Н. написали статью, имеют равные авторские права и несут одинаковую ответственность за плагиат.

Evgenii V. Ageenkov, Akeksandr A. Sitnikov, Elena N. Vodneva are the authors of the article, hold equal copyright and bear equal responsibility for plagiarism.

Конфликт интересов / Responsibility for plagiarism

Авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов.

The authors declare that there is no conflict of interest regarding the publication of this article.

Все авторы прочитали и одобрили окончательный вариант рукописи.

All authors have read and approved the final version of this manuscript.



Сведения об авторах / Information about the authors



Агеенков Евгений Валерьевич,
инженер,
Институт нефтегазовой геологии и геофизики им. А.А. Трофимука СО РАН,
630090, г. Новосибирск, просп. Академика Коптюга, 3, Россия,
✉ e-mail: aev@dnme.ru
Evgenii V. Ageenkov,
Engineer,
Trofimuk Institute of Petroleum Geology and Geophysics,
Siberian Branch of the Russian Academy of Sciences,
3 Koptug ave., Novosibirsk 630090, Russia,
✉ e-mail: aev@dnme.ru



Ситников Александр Анатольевич,
генеральный директор,
ООО «Сибирская геофизическая научно-производственная компания»,
664044, г. Иркутск, ул. Щапова, 9, Россия,
e-mail: aas@dnme.ru
Aleksandr A. Sitnikov,
CEO,
LLC "Siberian Geophysical Research and Production Company",
9 Shapova St., Irkutsk 664044, Russia,
e-mail: aas@dnme.ru



Воднева Елена Николаевна,
ведущий инженер,
Лимнологический институт СО РАН,
664033, г. Иркутск, ул. Улан-Баторская, 3, Россия,
e-mail: ven21@mail.ru
Elena N. Vodneva,
Leading Engineer,
Limnological Institute, Siberian Branch of the Russian Academy of Sciences,
3 Ulan-Batorskaya St., Irkutsk 664033, Russia,
e-mail: ven21@mail.ru



Оригинальная статья / Original article

УДК 622.245

DOI: <http://dx.doi.org/10.21285/2686-9993-2020-43-3-339-349>



Проблемы использования облегченного цемента для крепления нефтегазовых скважин и пути их решения

© Н.А. Буглов^a, Л.А. Бутакова^b, М.В. Бочарников^c

^{a-c}Иркутский национальный исследовательский технический университет, г. Иркутск, Россия

Резюме: В данной статье приведены результаты подбора рецептуры тампонажного раствора из цемента, не соответствующего стандарту качества, для цементирования верхней части колонны при строительстве нефтяной скважины. Объектом исследования являлся цемент марки ПЦТ III-об 5-50 ГОСТ 1581-96. В цемент вводились добавки, которые, согласно литературе, способны улучшить его технологические показатели: хлористый кальций (CaCl_2), хлористый натрий (NaCl), хлористый магний (MgCl_2), гипс ($\text{CaSO}_4 \cdot 2\text{H}_2\text{O}$), мраморная крошка (МК-100), микрокремнезем (МК-65, МК-85), каустическая и кальцинированная соды (NaOH и Na_2CO_3), а также полианионная целлюлоза высокой и низкой вязкости (ПАЦ ВВ и ПАЦ НВ). Определялись следующие технологические показатели: плотность раствора, растекаемость цементного теста, водоотделение, загустевание раствора, пределы прочности тампонажного камня при изгибе и сжатии. Исследования проводились с учетом отечественных и международных стандартов. Результаты испытаний показали, что применение добавок NaCl , MgCl_2 , CaCl_2 , Easy SET, МК-100 и $\text{CaSO}_4 \cdot 2\text{H}_2\text{O}$ улучшает водоотделение цементного раствора и прочностные характеристики цементного камня. Однако реагенты, предназначенные для снижения водоотделения (ПАЦ НВ, ПАЦ ВВ, Na_2CO_3 , NaOH , МК-65 и МК-85) существенно снижают прочностные характеристики цементного камня. Крепление колонны вышеупомянутым цементом возможно с применением следующих реагентов: CaCl_2 в количестве 2 %, NaCl в количестве 1,2 %, MgCl_2 в количестве 1 %, а также упрочняющего реагента Easy SET в количестве 1 % от массы цемента.

Ключевые слова: тампонажный раствор, облегченный цемент, цементирование, плотность, водоотделение, прочность, изгиб, сжатие, растекаемость

Благодарности: Авторы выражают благодарность ООО «Гранула» (г. Иркутск) за предоставление материала.

Информация о статье: поступила в редакцию 21 мая 2020 г.; поступила после рецензирования и доработки 03 августа 2020 г.; принята к публикации 02 сентября 2020 г.

Для цитирования: Буглов Н.А., Бутакова Л.А., Бочарников М.В. Проблемы использования облегченного цемента для крепления нефтегазовых скважин и пути их решения. *Науки о Земле и недропользование*. 2020. Т. 43. № 3. С. 339–349. <https://doi.org/10.21285/2686-9993-2020-43-3-339-349>

Problems of the use of lightweight cement in oil and gas well fixing and possible solutions

© Nikolai A. Buglov^a, Lyubov A. Butakova^b, Mikhail V. Bocharkov^c

^{a-c}Irkutsk National Research Technical University, Irkutsk, Russia

Abstract: The article presents the results of the selection of the grouting mortar made out of the cement that does not comply with the state standard (GOST) for cementing the upper part of the column during the construction of an oil well. The object of study was the cement grade PCT III-ob 5-50 GOST 1581-96. The study used the additives that, according to the literary sources, are able to enhance the cement technological parameters. The additives were calcium chloride (CaCl_2), sodium chloride, magnesium chloride (MgCl_2), gypsum ($\text{CaSO}_4 \cdot 2\text{H}_2\text{O}$), marble chips (МК-100), silica fume (МК-65, МК-85), caustic soda (NaOH) and calcined soda (Na_2CO_3), as well as high and low viscosity polyanionic cellulose. The following technological parameters were determined: the mortar density, the mortar paste spreadability, water separation, the thickening of the mortar, the ultimate bending and ultimate compression strength of the cement stone. The study was conducted taking into account the domestic and international standards. The test results show that the use of the agents such as NaCl , MgCl_2 , CaCl_2 , Easy SET, MK-100, and $\text{CaSO}_4 \cdot 2\text{H}_2\text{O}$ enhances the water separation of the mortar and the strength properties of the cement stone. However, the agents used to improve water separation (low viscosity polyanionic cellulose, high viscosity polyanionic cellulose, Na_2CO_3 , MK-65, and MK-85) significantly reduce the strength properties of the cement stone. The columns can be fixed with the above mentioned cement using agents such as CaCl_2 (2 % of the cement mass), NaCl (1.2 %), MgCl_2 (1 %), and the hardening agent Easy SET (1 % of the cement mass).

Keywords: grouting mortar, lightweight cement, cementing, density, water separation, strength, bending, compression, spreadability



Acknowledgments: We express our gratitude to LLC “Granula” for the provided material.

Information about the article: received May 21, 2020; revised August 03, 2020; accepted September 02, 2020.

For citation: Buglov NA, Butakova LA, Bocharkov MV. Problems of the use of lightweight cement in oil and gas well fixing and possible solutions. *Nauki o Zemle i nedropol'zovanie* = *Earth sciences and subsoil use*. 2020;43(3):339–349. (In Russ.) <https://doi.org/10.21285/2686-9993-2020-43-3-339-349>

Введение

Начало применения цементов при строительстве скважин принято отсчитывать с 1903 г. Вручную приготовленные цементы через желонки заливались за колонну обсадных труб. Разбуривание цементного стакана происходило через двое суток твердения [1]. В процессе усложнения проводки скважин технологии их строительства эволюционировали, а цементирование сейчас уже играет важную роль при строительстве скважин. В наши дни в процессе цементирования участует большое количество технических устройств, а время ожидания затвердевания цемента сократилось до минимальных значений. Тем не менее, цементирование не всегда стоит считать качественным^{1,2} [2, 3].

Правила безопасности в нефтяной и газовой промышленности подразумевают крепление направления и кондуктора до устья, а технических и эксплуатационных колонн нефтяных скважин – на 150 м, газовых – на 500 м выше башмака предыдущей колонны, но в настоящее время для снижения вероятности межколонных давлений, как правило, буровые и сервисные компании осуществляют цементирование колонн до устья скважины.

В целях исключения вероятности гидроизрыва пластов при подъеме цемента на большую высоту применяют ступенчатое цементирование или цементирование колонны с использованием пачек раствора разной плотности. Для крепления верхней части технических и эксплуатационных колонн применяют цементные растворы сниженной плотности [4, 5]. Широкое распространение в данных

условиях получили облегченные растворы на основе портландцементов, предусмотренных ГОСТ 1581-96 «Портландцементы тампонажные. Технические условия»³. Современная промышленность предлагает большой ассортимент облегченных цементов, где в качестве облегчающей добавки используют физические наполнители, пущцолановые наполнители, химические наполнители и газы, классической рецептурой все же считается смесь портландцемента с глинопорошком (относят к физическим наполнителям)⁴. Приемы, используемые для снижения плотности тампонажного материала и раствора, ухудшают его технологические показатели [6, 7]. Существенно это оказывается на седиментационной устойчивости раствора и прочностных характеристиках тампонажного камня, а следовательно, и на качестве изоляции пластов⁵ [8].

Кроме указанных выше факторов стоит учитывать продолжительность и условия хранения материала до его использования, горно-геологические условия проводки скважин и время ожидания затвердения цемента.

Объект исследования

«Инструкция по креплению нефтяных и газовых скважин»⁶ допускает применение как тампонажных материалов заводского производства, так и смесей, приготовленных непосредственно на буровой, при этом все тампонажные материалы должны подвергаться контролю на соответствие их техническим требованиям государственного стандарта, отраслевого стандарта или технических условий [9].

¹ Рязанов Я.А. Энциклопедия по буровым растворам. Оренбург: Летопись, 2005. 664 с.

² Митчелл Р. Справочник инженера-нефтяника. Т. II. Инжениринг бурения / пер. с англ. под ред. А.Г. Шатровского, С.О. Бородина. Ижевск: Изд-во Института компьютерных исследований, 2014. 1064 с.

³ ГОСТ 1581-96. Портландцементы тампонажные. Технические условия. Введ. 01.10.1998. М.: Минземстрой, ГУП ЦПП, 1998.

⁴ Рязанов Я.А. Энциклопедия по буровым растворам. Оренбург: Летопись, 2005. 664 с.

⁵ Митчелл Р. Справочник инженера-нефтяника. Т. II. Инжениринг бурения / пер. с англ. под ред. А.Г. Шатровского, С.О. Бородина. Ижевск: Изд-во Института компьютерных исследований, 2014. 1064 с.

⁶ РД 39-00147001-767-2000. Инструкция по креплению нефтяных и газовых скважин. Введ. 01.08.2000.



Технические показатели для тампонажных материалов, выпускаемых по ГОСТ 1581-96, приведены в табл. 1.

В данном государственном стандарте не предъявляется требований к цементам типа III по растекаемости, однако в ГОСТ 26798.1-96 «Цементы тампонажные. Методы испытаний»⁷ подбор отношения воды и цемента определяется на основе значения растекаемости, которое должно находиться в интервале 180–220 мм.

При несоответствии одного или нескольких показателей раствора техническим требованиям соответствующего стандарта его применение разрешается по результатам подбора рецептуры для конкретной скважины, если свойства раствора и камня соответствуют требованиям, представленным в «Инструкции по креплению нефтяных и газовых скважин» (табл. 2).

Время загустевания тампонажного раствора, определяемое при динамических температурах и давлениях, должно превышать время цементирования на 25 %, но не менее чем на 30 и не более чем на 90 мин.

В случае несоответствия раствора (камня) данным требованиям тампонажный материал отбраковывается и используется для других целей.

Вход в нефтяную отрасль иностранных сервисных компаний заставляет производство внедрять и интегрировать в промышленность помимо отечественных также и зарубежные стандарты. Так, при подборе рецептур стали уделять больше внимания пределу прочности цемента при сжатии. Стандарт, разработанный Американским институтом нефти (англ.: *American Petroleum Institute, API*), подразумевает, что цемент может считаться физическим барьерным элементом только тогда, когда он достиг минимальной прочности на сжатие в 50 фунтов на квадратный дюйм (0,35 МПа), измеренной в условиях моделируемого давления и температуры (в пределах лабораторного оборудования) в самой верхней зоне потока, при этом определение данного показателя может производиться как при помощи механического разрушения, так и с помощью звукового анализатора цемента.

Таблица 1. Требования к физико-химическим показателям цементов, соответствующих ГОСТ 1581-96 «Портландцементы тампонажные. Технические условия»
Table 1. Requirements for physical-chemical parameters of the cements meeting GOST 1581-96 «Well portland cements. Specifications»

Наименование показателя	Для температур 15–50 °C	Для температур 51–150 °C
Прочность при изгибе в возрасте двух суток, МПа	0,7	1
Водоотделение, мл	7,5	7,5
Время загустевания до консистенции 30 Вс, мин	Не менее 90	

Таблица 2. Основные требования к физико-химическим показателям рецептур цементов согласно РД 39-00147001-767-2000 «Инструкция по креплению нефтяных и газовых скважин»
Table 2. Basic requirements for the physical-chemical parameters of the cement formulations according to RD 39-00147001-767-2000 “Regulation on fixing oil and gas wells”

Наименование показателя	Значение
Прочность при изгибе по истечении времени ожидания затвердения цемента, МПа	0,5
Растекаемость, мм	160–220
Водоотделение, %: – вертикальные скважины и наклонные скважины с углом наклона до 10°; – наклонные скважины с углом наклона от 10° до 45°; – наклонные скважины с углом наклона более 45° и горизонтальные скважины	Не более 2,5 Не более 1 0

⁷ ГОСТ 26798.1-96. Цементы тампонажные. Методы испытаний. Введ. 01.10.1998. М.: Минземстрой России, ГУП ЦПП, 1998.



Прочность облегченных цементов при тестировании на соответствие стандартам качества определяется через 48 ч твердения и очень часто находится у нижней границы предела. В целях снижения стоимости строительства скважины буровые предприятия сокращают время ожидания затвердения цемента, что также ведет к снижению прочностных характеристик камня.

Методы исследования

В Лабораторию буровых растворов и крепления скважин кафедры нефтегазового дела Иркутского национального исследовательского технического университета был доставлен тампонажный цемент марки ПЦТ III-об 5-50 ГОСТ 1581-96, не соответствующий стандарту качества, для определения возможности его применения при цементировании колонны в условиях, приведенных в табл. 3.

При подборе рецептуры тампонажного раствора по стандартам API рекомендуется определять плотность с помощью рычажных весов, измеряющих плотность растворов, находящихся под давлением. Путем повышения давления в емкости с испытуемым раствором при помощи специального шприца объем вовлеченного в образец воздуха может быть значительно уменьшен, что повышает точность измерений.

Определение растекаемости тампонажного раствора осуществлялось в соответствии с ГОСТ 26798.1-96 на приборе «Конус АЗНИИ» Азербайджанского нефтяного научно-исследовательского института им. В. Куйбышева (Россия).

Водоотделение тампонажного раствора осуществлялось также в соответствии с ГОСТ

26798.1-96 при помощи двух мерных цилиндров по 250 мл, мерного цилиндра 20 мл, пипетки.

Предел прочности тампонажного камня определялся на гидравлическом прессе для испытания образцов на прочность фирмы Matest (Италия). Данный прибор предназначен для определения предела прочности образцов цементного камня при изгибе и / или сжатии после их выдержки в специальных формах в условиях, имитирующих условия скважины. Он позволяет сохранить результаты испытаний на электронном носителе, а также представить информацию в распечатанном виде.

Седиментационную устойчивость повышают вводом высокодисперсных добавок, которые способны связывать большее количество воды своей поверхностью, на практике применяют широкий список химических реагентов, к которым относятся гипан, винно-каменная кислота, каустическая сода, глина, производные целлюлозы, микрокремнезем [2, 8], хлориды солей, мраморная крошка⁸ [5, 8, 10, 11] и т. д.

При проведении описанного исследования первыми были испытаны реагенты, имеющиеся на буровой: полианионная целлюлоза высокой и низкой вязкости (ПАЦ ВВ и ПАЦ НВ), каустическая и кальцинированная соды (NaOH и Na₂CO₃), хлориды натрия, кальция и магния (NaCl, CaCl₂, MgCl₂), а также «водопотребляющие» реагенты, применение которых повышает прочностные характеристики цементного камня. В данной работе мраморная крошка обозначается как МК-100, микрокремнезем с содержанием SiO₂ не менее 65 % – МК-65, микрокремнезем с содержанием SiO₂ не менее 85 % – МК-85 [10–17].

Таблица 3. Условия цементирования колонны
Table 3. Column cementing conditions

Наименование технологической характеристики	Значение
Планируемая плотность раствора, кг/м ³	1500
Температура в месте нахождения пачки данного цемента, °С	22
Гидродинамическое давление, атм.	20
Время выполнения работ по цементированию, ч	3
Время ожидания затвердения цемента, ч	24

⁸ Митчелл Р. Справочник инженера-нефтяника. Т. II. Инженеринг бурения / пер. с англ. под ред. А.Г. Шатровского, С.О. Бороздина. Ижевск: Изд-во Института компьютерных исследований, 2014. 1064 с.



Результаты исследования и их обсуждение

Результаты тестирования чистого цементного раствора представлены в табл. 4. Из таблицы видно, что у цементного раствора слишком высоки значения водоотделения, растекаемости, времени загустевания. У цементного камня, приготовленного из этого раствора, слишком низкие прочностные показатели.

Первоочередной задачей было снижение водоотделения цементного раствора, для этих целей были использованы ПАЦ НВ, ПАЦ ВВ, Na_2CO_3 , NaOH . Результаты применения этих добавок приведены в табл. 5.

Результаты испытаний по снижению водоотделения облегченного цементного раствора графически представлены на рис. 1.

Таблица 4. Результаты тестирования цемента ПЦТ III-об 5-50

Table 4. Testing results for cement PCT III-ob 5-50

Водо- отделение, мл	Плотность, г/см ³	Растека- емость, мм	Время загустевания тампонажного раствора до консистенции 30 Вс, мин	Прочность		Прочность	
				через 24 ч, МПа	Изгиб	через 48 ч, МПа	Изгиб
11,35	1,5	>250	>400	0,07	0,69	0,3	1,68

Таблица 5. Применение добавок, снижающих водоотделение цементного теста и повышающих прочность цементного камня

Table 5. The use of the additives that reduce the water separation of the cement paste and increase the strength of the cement stone

Добавка	Концентрация, %	Водоотделение, мл	Плотность, г/см ³	Прочность		Прочность	
				через 24 ч, МПа	Изгиб	через 48 ч, МПа	Изгиб
Реагенты, имеющиеся на кустовой площадке							
ПАЦ НВ	0,3	5,7	1,5	–	–	0,4	0,7
ПАЦ ВВ	0,3	7	1,5	–	–	0,65	1,4
Na_2CO_3	1	1	1,5	0,06	–	0,63	1,3
NaOH	1	12,5	1,5	–	–	1,08	2,3
Реагенты, применение которых повышает качество цементного камня (раствора)							
$\text{CaSO}_4 \cdot 2\text{H}_2\text{O}$	1	6	1,5	0,32	0,49	0,62	1,05
	2	3	1,51	0,28	0,47	0,33	0,91
	3	1,6	1,51	0,23	0,4	0,41	0,73
МК-100	1	8,7	1,5	0,42	0,68	0,68	1,93
	2	8	1,5	0,44	0,77	–	1,6
	3	8	1,51	0,63	0,71	0,47	1,31
CaCl_2	1	13	1,5	0,54	1,04	0,56	1,9
	2	4,2	1,51	0,68	1,12	0,37	1,53
	3	11	1,51	0,63	0,83	0,08	1,39
NaCl	1	5,5	1,5	0,59	1,2	0,99	2,14
	2	5	1,51	0,78	1,56	0,1	2,54
	3	11	1,51	0,01	1,24	0,61	2,18
MgCl_2	1	3	1,5	0,51	0,72	0,64	1,39
	2	6	1,5	0,45	0,6	0,65	0,96
	3	4	1,51	0,44	0,78	0,57	1,18
МК-65	2	10	1,5	–	–	0,2	1,5
	4	10	1,51	–	–	0,58	1,2
МК-85	2	10	1,5	–	–	0,69	1,33
	4	7,5	1,51	–	–	0,58	1,1
Упрочняющий реагент «Гранула»							
Easy SET	1	8	1,5	0,52	0,89	0,42	1,43
	2	8	1,5	0,44	0,85	0,49	1,24
	3	8	1,5	0,41	0,98	0,53	1,32

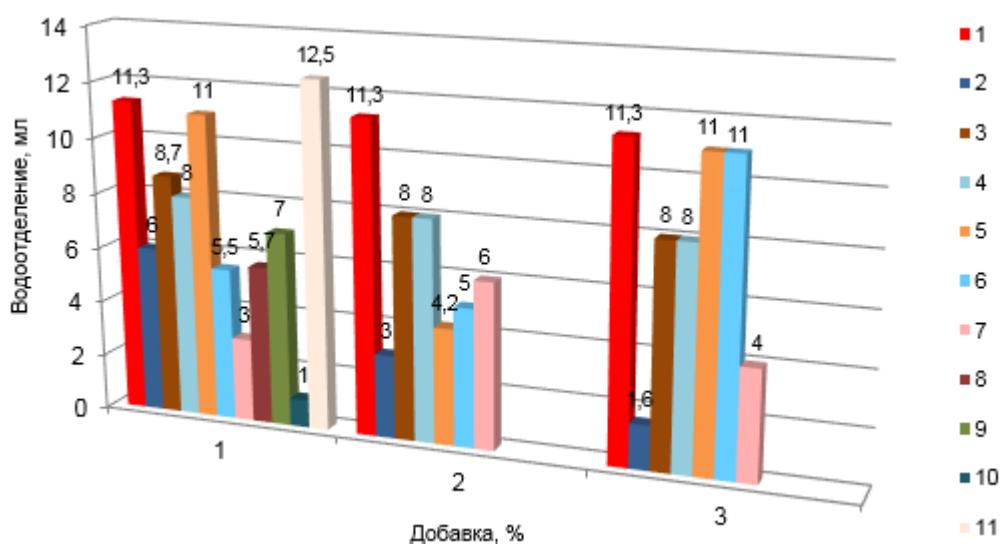


Рис. 1. Зависимость водоотделения цемента марки ПЦТ III-об 5-50 от добавки:
1 – чистый; 2 – $\text{CaSO}_4 \cdot 2\text{H}_2\text{O}$; 3 – МК-100; 4 – Easy SET; 5 – CaCl_2 ; 6 – NaCl ; 7 – MgCl_2 ;
8 – ПАЦ НВ; 9 – ПАЦ ВВ; 10 – Na_2CO_3 ; 11 – NaOH

Fig. 1. The relationship between the water separation (type PCT III-r 5-50) and the additive:
1 – pure; 2 – $\text{CaSO}_4 \cdot 2\text{H}_2\text{O}$; 3 – MK-100; 4 – Easy SET; 5 – CaCl_2 ; 6 – NaCl ; 7 – MgCl_2 ;
8 – PAC HB; 9 – PAC BB; 10 – Na_2CO_3 ; 11 – NaOH

Вещества, плотность которых составляет более $2000 \text{ кг}/\text{см}^3$, удалось вводить только в количестве не более 3 %, так как дальнейшее увеличение концентрации реагентов негативным образом повлияет на плотность тампонажного раствора. В этом случае придется вновь увеличивать водоцементное отношение, что еще более ухудшит ситуацию.

Для повышения прочностных характеристик был протестирован ряд добавок, приме-

нение которых способно снизить водоотделение раствора. В этом отношении оказалось действенным применение эфиров целлюлозы. Na_2CO_3 снизила водоотделение растворов до 1 мл, а вот применение NaOH не оказалось положительного эффекта на данный показатель.

Все представленные реагенты (рис. 2) повышают прочность при изгибе цементного камня, но по результатам испытаний только CaCl_2 в количестве 1, 2, 3 %, NaCl в количестве

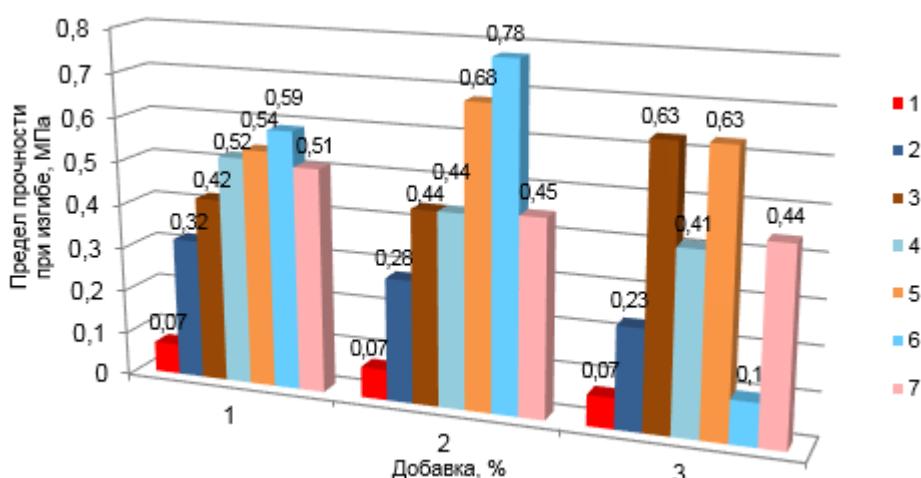


Рис. 2. Зависимость предела прочности при изгибе через 24 ч цемента марки ПЦТ III-об 5-50 от добавки:

1 – чистый; 2 – $\text{CaSO}_4 \cdot 2\text{H}_2\text{O}$; 3 – МК-100; 4 – Easy SET; 5 – CaCl_2 ; 6 – NaCl ; 7 – MgCl_2

Fig. 2. The relationship between the ultimate bending strength (after 24 hours) of the cement PCT III-r 5-50 and the additive:

1 – pure; 2 – $\text{CaSO}_4 \cdot 2\text{H}_2\text{O}$; 3 – MK-100; 4 – Easy SET; 5 – CaCl_2 ; 6 – NaCl ; 7 – MgCl_2



1, 2 %, $MgCl_2$ в количестве 1 % и Easy SET в количестве 1 % от массы цемента применимы для цементирования колонны в данных условиях.

Предел прочности при изгибе и сжатии образцов цемента с добавками ПАЦ НВ и ПАЦ ВВ в количестве 0,3 %, Na_2CO_3 в количестве 1 %, $NaOH$ в количестве 1 % от массы цемента, МК-65 и МК-85 через одни сутки определить не удалось в связи с малыми значениями. Время загустевания растворов всех рецептур до консистенции 30 Вс превышает 300 мин. Начало схватывания растворов всех рецептур превышает 8 ч. Значения предела прочности на сжатие графически изображены на рис. 3.

Требования к цементному камню по прочности при сжатии в отечественной практике не предъявляются⁹. По стандарту API значение прочности при сжатии цементного камня позволяет считать его барьерным элементом и разрешает продолжать работы в скважине. Применение $CaSO_4 \cdot 2H_2O$ негативным образом оказывается на значении данного показателя, но использование его для цементирования возможно. Все остальные добавки повышают прочность камня.

На рис. 4, 5 представлены результаты испытаний прочности при изгибе и сжатии об-

разцов цементного камня после 48 ч твердения. Из графиков видно, что значение прочности камня при изгибе с применением ПАЦ НВ и МК-65 в количестве 2 % от массы цемента не достигает предельных значений даже через 48 ч твердения. ПАЦ ВВ, Na_2CO_3 , $NaOH$, МК-65 в количестве 4 %, МК-85 в количестве 2 и 4 % от массы цемента достигает минимальных значений только через 48 ч.

Заключение

Результаты трех недель исследований показали, что крепление колонн данным цементом возможно, но с применением в качестве добавок $CaCl_2$ в количестве 2 %, $NaCl$ в количестве 1,2 %, $MgCl_2$ в количестве 1 % от массы цемента по параметрам водоотделения тампонажного раствора и прочностным характеристикам. Также возможно применение упрочняющего агента Easy SET, но с дополнительными испытаниями по снижению водоотделения.

Значения по показателям загустевания тампонажного раствора до консистенции 30 Вс превышают 300 мин, ввод всех вышеуказанных добавок видимых результатов не дал. Снижение значения растекаемости до 250 мм также не выявлено.

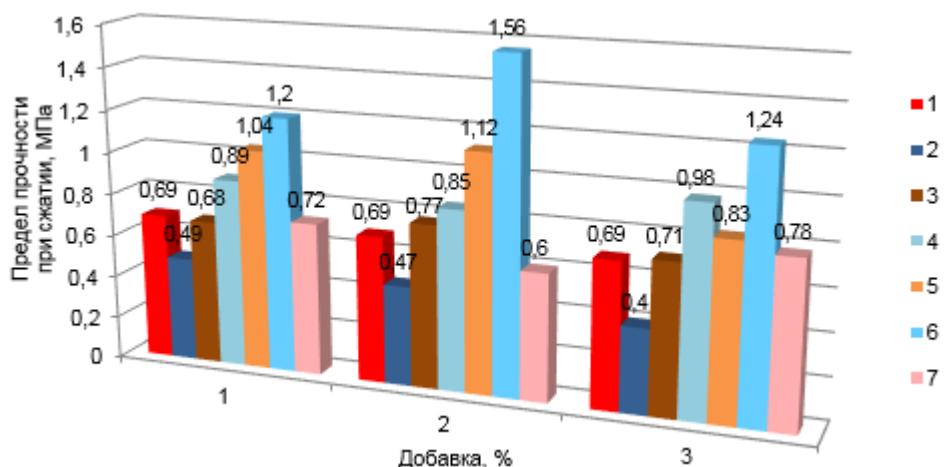


Рис. 3. Зависимость предела прочности при сжатии через 24 ч цемента марки ПЦТ III-об 5-50 от добавки:

1 – чистый; 2 – $CaSO_4 \cdot 2H_2O$; 3 – МК-100; 4 – Easy SET; 5 – $CaCl_2$; 6 – $NaCl$; 7 – $MgCl_2$

Fig. 3. The relationship between the ultimate compression strength (after 24 hours) of the cement PCT III-r 5-50 and the additive:

1 – pure; 2 – $CaSO_4 \cdot 2H_2O$; 3 – MK-100; 4 – Easy SET; 5 – $CaCl_2$; 6 – $NaCl$; 7 – $MgCl_2$

⁹ Митчелл Р. Справочник инженера-нефтяника. Т. II. Инженеринг бурения / пер. с англ. под ред. А.Г. Шатровского, С.О. Бороздина. Ижевск: Изд-во Института компьютерных исследований, 2014. 1064 с.

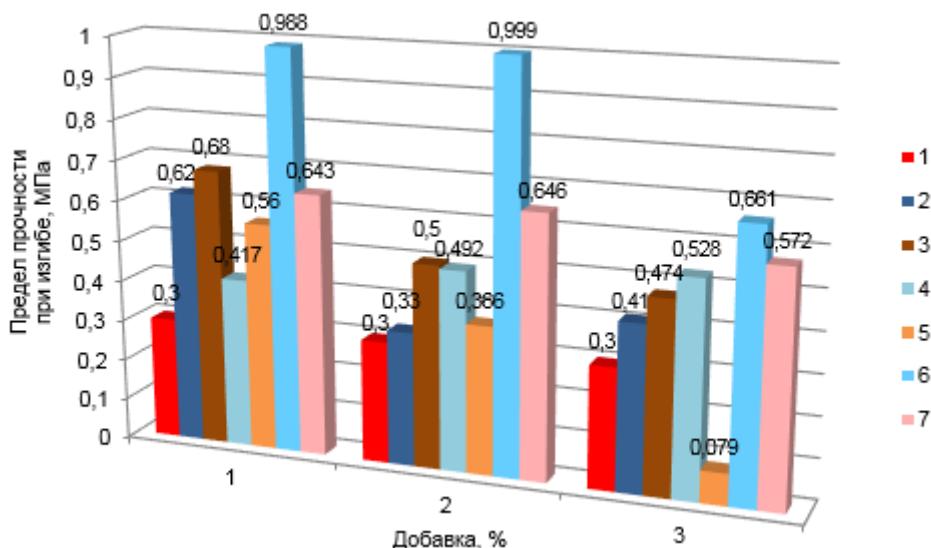


Рис. 4. Зависимость предела прочности при изгибе через 48 ч

цемента марки ПЦТ III-об 5-50 от добавки:

1 – чистый; 2 – $\text{CaSO}_4 \cdot 2\text{H}_2\text{O}$; 3 – MK-100; 4 – Easy SET; 5 – CaCl_2 ; 6 – NaCl ; 7 – MgCl_2

Fig. 4. The relationship between the ultimate bending strength (after 48 hours)

of the cement PCT III-ob 5-50 and the additive:

1 – pure; 2 – $\text{CaSO}_4 \cdot 2\text{H}_2\text{O}$; 3 – MK-100; 4 – Easy SET; 5 – CaCl_2 ; 6 – NaCl ; 7 – MgCl_2

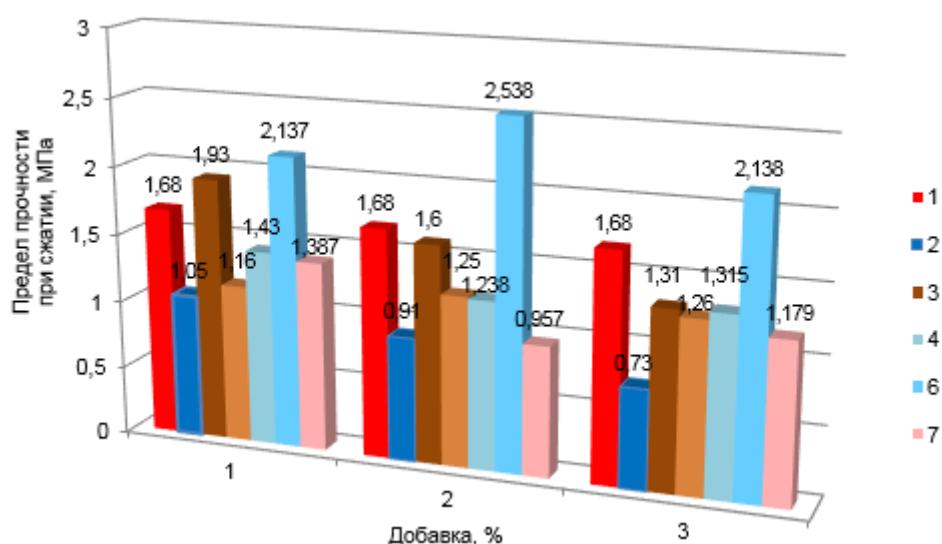


Рис. 5. Зависимость предела прочности при сжатии через 48 ч

цемента марки ПЦТ III-об 5-50 от добавки:

1 – чистый; 2 – $\text{CaSO}_4 \cdot 2\text{H}_2\text{O}$; 3 – MK-100; 4 – Easy SET; 5 – CaCl_2 ; 6 – NaCl ; 7 – MgCl_2

Fig. 5. The relationship between the ultimate compression strength (after 48 hours)

of the cement type PCT III-ob 5-50 and the additive:

1 – pure; 2 – $\text{CaSO}_4 \cdot 2\text{H}_2\text{O}$; 3 – MK-100; 4 – Easy SET; 5 – CaCl_2 ; 6 – NaCl ; 7 – MgCl_2

Применение в качестве добавок $\text{CaSO}_4 \cdot 2\text{H}_2\text{O}$, MK-100 и NaCl , CaCl_2 , MgCl_2 повышает химическую активность цемента на первые и на вторые сутки твердения, тем не менее количество отбракованных тестов

весьма велико. Кроме рекомендаций по применению химических реагентов рекомендовано обратить внимание на сроки и условия хранения материала.



Библиографический список

1. Мильштейн В.М. Цементирование буровых скважин. Краснодар: Просвящение-Юг, 2003. 375 с.
2. Булатов А.И., Мариампольский Н.А. Регулирование технологических показателей тампонажных растворов. М.: Недра, 1988. 224 с.
3. Averkina E.V., Shakirova E.V., Butakova L.A. Research on ecologically safe flokulants in clay fluid fluids // IOP Conference. Series: Materials Science and Engineering. 2020. Vol. 760. P. 012052. <https://doi.org/10.1088/1757-899X/760/1/012052>
4. Вороник А.М., Каменских С.В., Краснов С.А. Анализ свойств и параметров облегченных тампонажных растворов и смесей // Строительство нефтяных и газовых скважин на суше и на море. 2016. № 10. С. 35–41.
5. Katende A., Lu Y., Bunger A., Radonjic M. Experimental quantification of the effect of oil based drilling fluid contamination on properties of wellbore cement // Journal of Natural Gas Science and Engineering. 2020. Vol. 79. P. 103328. <https://doi.org/10.1016/j.jngse.2020.103328>
6. Петрушин В. Применение облегченного тампонажного цемента в ОАО «Сургутнефтегаз» // Бурение и нефть. 2005. № 3. С. 28–29.
7. Катеев Р.И., Амерханова С.И., Газизов М.Г. Применение облегченной тампонажной смеси при цементировании в одну ступень // Материалы научной сессии ученых Альметьевского государственного нефтяного института. 2013. № 1. С. 72–76.
8. Bayanaka M., Zarinabadi S., Shahbazi K., Azimi A. Effects of Nano Silica on oil well cement slurry characteristics and control of gas channeling // South African Journal of Chemical Engineering. 2020. Vol. 34. P. 11–25. <https://doi.org/10.1016/j.sajce.2020.05.006>
9. Thakkar A., Raval A., Chandra S., Shah M., Sircar A. A comprehensive review of the application of nano-silica in oil well cementing // Petroleum. 2020. Iss. 2. P. 123–129.
10. Щербич Н.Е., Белей И.И., Кашникова Л.Л., Родер С.А., Кармацких С.А., Вялов В.В. [и др.]. Резуль-
- таты исследований морозостойкости камня облегченных тампонажных цементов // Бурение и нефть. 2008. № 4. С. 15–18.
11. Овчинников П.В., Кузнецов В.Г., Фролов А.А., Овчинников В.П., Шатов А.А., Урманчеев В.И. Специальные тампонажные материалы для низкотемпературных скважин. М.: Недра, 2002. 115 с.
12. Зимина Д.А., Двойников Д.А. Улучшение качества цементирования скважин в многолетнемерзлых горных породах // Проблемы геологии и освоения недр: труды XXI Междунар. симп. им. акад. М.А. Усова студентов и молодых ученых, посвящ. 130-летию со дня рождения проф. М.И. Кучина. В 2 т. Т. 2. Томск: Изд-во ТПУ, 2017. С. 89–90.
13. Каримов Н.Х., Аззамов Ф.А., Газизов Х.В., Каримов И.Н., Комлева С.Ф. Облегченный тампонажный раствор с улучшенными технологическими свойствами // Известия высших учебных заведений. Нефть и газ. 1997. № 6. С. 45.
14. Исламгилова Э.Р., Аззамов Ф.А., Аббас А.Д. Оптимизация дисперсности добавок в самозалечивающихся цементах // Георесурсы. 2017. Т. 19. № 2. С. 129–134. <http://doi.org/10.18599/grs.19.2.7>
15. Бекбаев А.А., Аззамов Ф.А., Хафизов А.Р., Лягов А.В. Исследование армированных облегченных тампонажных материалов // Нанотехнологии в строительстве. 2017. Т. 9. № 4. С. 131–148. <http://doi.org/10.15828/2075-8545-2017-9-4-131-148>
16. Бекбаев А.А., Аззамов Ф.А., Комлева С.Ф. Дисперсное армирование облегченных цементов // Нефтяная провинция. 2018. № 3 (15). С. 127–141. <http://doi.org/10.25689/NP.2018.3.127-141>
17. Бакиров Д.Л., Бурдыга В.А., Мелехов А.В. Специальный облегченный тампонажный состав для боковых стволов в условиях Западной Сибири // Строительство нефтяных и газовых скважин на суше и на море. 2018. № 10. С. 39–41.

References

1. Mil'shtein VM. *Drillhole cementing*. Krasnodar: Prosvyashchenie-Yug; 2003. 375 p. (In Russ.)
2. Bulatov AI, Mariampol'skii NA. *Control of the technological parameters of grouting mortars*. Moscow: Nedra; 1988. 224 p. (In Russ.)
3. Averkina EV, Shakirova EV, Butakova LA. Research on ecologically safe flokulants in clay fluid fluids. IOP Conference. Series: Materials Science and Engineering. 2020;760:012052. <https://doi.org/10.1088/1757-899X/760/1/012052>
4. Voronik AM, Kamenskikh SV, Krasnov SA. Analysis of properties and parameters of the facilitated grouting solutions and mixtures. *Stroitel'stvo neftyanykh i gazovykh skvazhin na sushe i na more*. 2016;10:35–41. (In Russ.)
5. Katende A, Lu Y, Bunger A, Radonjic M. Experimental quantification of the effect of oil based drilling fluid contamination on properties of wellbore cement. *Journal of Natural Gas Science and Engineering*. 2020;79:103328. <https://doi.org/10.1016/j.jngse.2020.103328>
6. Petrushin V. The use of lightweight grouting mortar in JSC "Surgutneftegas". *Burenie i neft'*. 2005;3:28–29. (In Russ.)
7. Kateev RI, Amerhanova SI, Gazizov MG. Light weighted cement slurries for a single-stage cementing. *Materialy nauchnoi sessii uchenykh Al'met'evskogo gosudarstvennogo neftyanogo instituta*. 2013;1:72–76. (In Russ.)
8. Bayanaka M, Zarinabadi S, Shahbazi K, Azimi A. Effects of Nano Silica on oil well cement slurry characteristics and control of gas channeling. *South African Journal of Chemical Engineering*. 2020;34:11–25. <https://doi.org/10.1016/j.sajce.2020.05.006>
9. Thakkar A, Raval A, Chandra S, Shah M, Sircar A. A comprehensive review of the application of nano-silica in oil well cementing. *Petroleum*. 2020;2:123–129.



10. Shcherbich NE, Beley II, Kashnikova LL, Roder SA, Karmatskikh SA, Vyalov VV, et al. Results of researches of frost resistance of the stone of light slurry cements. *Burenie i neft'*. 2008;4:15–18. (In Russ.)
11. Ovchinnikov PV, Kuznetsov VG, Frolov AA, Ovchinnikov VP, Shatov AA, Urmacheev VI. *Special purpose grouting materials for low-temperature wells*. Moscow: Nedra; 2002. 115 p. (In Russ.)
12. Zimina DA, Dvoinikov DA. Enhancing the quality of well cementing in permafrost. In: *Problemy geologii i osvoeniya nedor: trudy XXI Mezhdunarodnogo simpoziuma imeni akademika M.A. Usova studentov i molodyykh uchenykh, posvyashchennogo 130-letiyu so dnya rozhdeniya professora M.I. Kuchina = Problems of Geology and Earth Subsoil Exploitation: Proceedings of the 21st International Symposium of Students and Young Researchers named after M.A. Usov, dedicated to the 130th anniversary of birth of Professor M.I. Kuchin*. In 2 vol. Vol. 2. Tomsk: Tomsk Polytechnic University; 2017. p.89–90. (In Russ.)
13. Karimov NKh, Agzamov FA, Gazizov KhV, Karimov IN, Komleva SF. Lightweight grouting mortar with enhanced technological properties. *Izvestiya vysshikh uchebnykh zavedenii. Neft' i gaz = Oil and Gas Studies*. 1997;6:45. (In Russ.)
14. Ismagilova ER, Agzamov FA, Abbas AJ. Optimization of self-healing additives dispersity in cement. *Georesursy = Georesources*. 2017;19(2):129–134. (In Russ.) <http://doi.org/10.18599/grs.19.2.7>
15. Bekbaev AA, Agzamov FA, Khafizov AR, Lyagov AV. Experimental research on reinforced lightweight plugging composites. *Nanotekhnologii v stroitel'stve = Nanotechnologies in construction*. 2017;9(4):131–148. (In Russ.) <http://doi.org/10.15828/2075-8545-2017-9-4-131-148>
16. Bekbaev AA, Agzamov FA, Komleva SF. Fiber-reinforced lightweight cement. *Neftyanaya provintsiya*. 2018;3:127–141. (In Russ.) <http://doi.org/10.25689/NP.2018.3.127-141>
17. Bakirov DL, Burdyga VA, Melekhov AV. Use of special lightweight cement composition for side tracks under conditions of the Western Siberia. *Stroitel'stvo neftyanykh i gazovykh skvazhin na sushe i na more*. 2018;10:39–41. (In Russ.)

Критерии авторства / Authorship criteria

Буглов Н.А., Бутакова Л.А., Бочарников М.В. написали статью, имеют равные авторские права и несут одинаковую ответственность за plagiat.

Nikolai A. Buglov, Lyubov A. Butakova, Mikhail V. Bocharnikov are the authors of the article, hold equal copyright and bear equal responsibility for plagiarism.

Конфликт интересов / Responsibility for plagiarism

Авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов.

The authors declare that there is no conflict of interest regarding the publication of this article.

Все авторы прочитали и одобрили окончательный вариант рукописи.

All authors have read and approved the final version of this manuscript.

Сведения об авторах / Information about the authors



Буглов Николай Александрович,
кандидат технических наук, доцент,
заведующий кафедрой нефтегазового дела,
Институт недропользования,
Иркутский национальный исследовательский технический университет,
664074, г. Иркутск, ул. Лермонтова, 83, Россия,
e-mail: bna@istu.edu
Nikolai A. Buglov,
Cand. Sci. (Eng.), Docent,
Head of Oil and Gas Engineering Department,
Institute of Subsoil Use,
Irkutsk National Research Technical University,
83 Lermontov St., Irkutsk 664074, Russia,
e-mail: bna@istu.edu



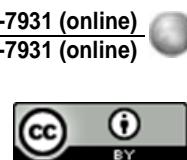
Бутакова Любовь Александровна,
специалист по учебно-методической работе учебно-исследовательской
Лаборатории буровых растворов и крепления скважин,
Институт недропользования,
Иркутский национальный исследовательский технический университет,
664074, г. Иркутск, ул. Лермонтова, 83, Россия,
✉ e-mail: lyubov.elizarova.89@bk.ru

Lyubov A. Butakova,
Specialist on Educational and Methodological Work,
Research Laboratory of Drilling Muds and Well Cementing,
Institute of Subsoil Use,
Irkutsk National Research Technical University,
83 Lermontov St., Irkutsk 664074, Russia,
✉ e-mail: lyubov.elizarova.89@bk.ru



Бочарников Михаил Витальевич,
аспирант,
учебный мастер учебно-исследовательской
Лаборатории буровых растворов и крепления скважин,
Институт недропользования,
Иркутский национальный исследовательский технический университет,
664074, г. Иркутск, ул. Лермонтова, 83, Россия,
e-mail: lab.ngd@istu.edu

Mikhail V. Bocharnikov,
Post-graduate Student,
Training Facilitator,
Research Laboratory of Drilling Muds and Well Cementing,
Institute of Subsoil Use,
Irkutsk National Research Technical University,
83 Lermontov St., Irkutsk 664074, Russia,
e-mail: lab.ngd@istu.edu



Оригинальная статья / Original article

УДК 551.243.8:552.578.2.061.553.98(47)

DOI: <http://dx.doi.org/10.21285/2686-9993-2020-43-3-350-363>

Влияние особенностей геологического строения Верхнечонского нефтегазоконденсатного месторождения на систему его разработки и эксплуатации

© Л.А. Рапацкая^a^aИркутский национальный исследовательский технический университет, г. Иркутск, Россия

Резюме: Целью исследования является анализ зависимости между уточнением сложности геологического строения Верхнечонского нефтегазоконденсатного месторождения и корректировкой планов его разработки. В работе использованы данные опытно-промышленной эксплуатации ОАО «Верхнечонскнефтегаз» по разведочным и эксплуатационным скважинам, результаты геофизических работ и материалы исследований, опубликованные в открытой печати. Верхнечонское месторождение имеет уникальное по сложности геологическое строение, что обусловлено сочетанием тектонических нарушений, сопровождавшихся внедрением траппов, высокой минерализацией пластовых вод, резкой изменчивостью фильтрационно-емкостных свойств продуктивных горизонтов по площади и разрезу из-за невыдержанности литологического состава коллекторов, их засолонения и полного выклинивания. Система разработки любого месторождения должна учитывать особенности его структурно-тектонического, литолого-фациального строения и отвечать конкретным технико-экономическим требованиям, предъявляемым к бурению и эксплуатации скважин. Сложность строения Верхнечонского месторождения диктует особо тщательный выбор системы разработки, которая закономерно изменяется по мере изучения особенностей строения месторождения. Так, на первых этапах разработки месторождения был предложен проект бурения вертикальных скважин, который вскоре сменился проектом бурения наклонно-горизонтальных скважин с расчетом двух вариантов. По проекту опытно-промышленной эксплуатации Верхнечонского нефтегазоконденсатного месторождения ОАО «Верхнечонскнефтегаз» для наиболее разведанных залежей I и II блоков верхнечонского горизонта были разработаны два варианта равномерных сеток наклонно-направленных и горизонтальных скважин с площадным заводнением. В связи с развитыми процессами вторичного засолонения коллекторов использование метода заводнения потребовало изучения состава пластовых вод. Предложенный план бурения с применением забойного двигателя и гамма-каротажа не обеспечивал проводку стволов по наиболее продуктивным участкам пласта, вследствие чего дебиты некоторых наклонно-направленных и горизонтальных скважин оказались недостаточно высокими. С целью увеличения эффективности бурения специалисты департамента буровых работ ОАО «Верхнечонскнефтегаз» совместно со специалистами департамента по геологии и разработке месторождений компании Schlumberger предложили новую методику, позволяющую повысить эффективность бурения за счет использования роторно-управляемой системы, каротажа во время бурения и геонавигации. Таким образом, система разработки Верхнечонского месторождения изменялась по мере уточнения особенностей геологического строения, анизотропии фильтрационно-емкостных свойств и толщин продуктивных горизонтов по площади и разрезу, их засолонения и полного выклинивания, состава пластовых вод.

Ключевые слова: Сибирская платформа, Верхнечонское месторождение, тектоника, разломы, траппы, продуктивные горизонты, засолонение, пластовые воды, системы разработки, наклонно-направленные и горизонтальные скважины

Информация о статье: поступила в редакцию 17 июня 2020 г.; поступила после рецензирования и доработки 30 июля 2020 г.; принята к публикации 31 августа 2020 г.

Для цитирования: Рапацкая Л.А. Влияние особенностей геологического строения Верхнечонского нефтегазоконденсатного месторождения на систему его разработки и эксплуатации. *Науки о Земле и недропользование*. 2020. Т. 43. № 3. С. 350–363. <https://doi.org/10.21285/2686-9993-2020-43-3-350-363>

The features of the geological structure of the Verkhnechonsky oil and gas condensate field and their influence on the field development and operation system

© Larisa A. Rapatskaya^a^aIrkutsk National Research Technical University, Irkutsk, Russia

Abstract: The study aims to analyze the relationship between the redetermination of the complexity of the geological structure of the Verkhnechonsky oil and gas condensate field and the schedule adjustment of the field development plans. The paper uses the data on the exploration and production wells obtained from the pilot operation of JSC Verkhne-



chonskneftegaz, the geophysical work results, and the research materials publicly available in the press. The geological structure of the Verhnechonskoye oil and gas condensate field is unique in its complexity. This is due to the following factors: a combination of tectonic disturbances accompanied by the intrusion of traps; high mineralization of the reservoir water; sharp variability of the filtration and reservoir properties of the producing horizons by area and section due to the unevenness of the lithological composition of the reservoirs, their salinization and complete pinch-out. The development system of any field should take into account the peculiarities of the field's tectonic and lithological-facies structure, and meet specific technical and economic requirements for drilling and operating wells. The complexity of the field structure requires a thorough selection of a development system that inevitably changes as the features of the field structure are studied, e.g. vertical drilling suggested at the initial stage of the field development was shortly after replaced with inclined-horizontal drilling with the calculation of two options. Within the pilot operation project of the Verkhnechonsky field, JSC Verkhnechonskneftegaz has developed two variants of uniform grids of directional and horizontal wells with pattern flooding for the most explored deposits of the Verkhnechonsky horizon of blocks I and II. Because of the intensive processes of the reservoirs' secondary salinization, the flooding method required a study of the reservoir water composition. However, the proposed drilling plan using a downhole engine and gamma-ray logging could not ensure the wellbores ducting through the most productive sections of the horizon, therefore, the flow rates of some directional and horizontal wells were not high enough. To increase the drilling efficiency, the specialists of the Drilling Department (JSC Verhnechonskneftegaz), together with the Department of Geology and Field Development (Schlumberger Ltd.), proposed a new methodology that increases the drilling efficiency by using a rotary-controlled system, logging-while-drilling, and geosteering. Thus, the development system of the Verkhnechonsky oil and gas condensate field was changing in the process of specifying the field's geological structure, anisotropy reservoir properties, and the thickness of the producing horizons in size and cut, their salinization and pinch-out, and the composition of the reservoir waters.

Keywords: Verkhnechonsky oil and gas condensate field, tectonics, traps, producing horizons, reservoir, salinization, reservoir waters, development systems

Information about the article: received June 17, 2020; revised July 30, 2020; accepted August 31, 2020.

For citation: Rapatskaya LA. The features of the geological structure of the Verkhnechonsky oil and gas condensate field and their influence on the field development and operation system. *Nauki o Zemle i nedropol'zovanie = Earth sciences and subsoil use.* 2020;43(3):350–363. (In Russ.) <https://doi.org/10.21285/2686-9993-2020-43-3-350-363>

Введение

Верхнечонское нефтегазоконденсатное месторождение (ВЧНГКМ) общей площадью 2,4 тыс. км² является крупнейшим в Иркутской области и вторым по величине на востоке России. Относится ВЧНГКМ к Восточно-Сугдинскому нефтегазоносному участку Непско-Ботубинской нефтегазоносной области Лено-Тунгусской нефтегазоносной провинции. В геоструктурном отношении месторождение приурочено к северо-западной периклиниали Чоно-Пеледуйского поднятия в пределах присводовой части Непско-Ботубинской антеклизы и связано со сложно построенной структурой размером 65×45 км.

Материалы и методы исследования

ВЧНГКМ – уникальное месторождение по степени сложности геологического строения. Это обусловлено сочетанием тектонических нарушений, сопровождавшихся внедрением траппов, высокой минерализацией пластовых вод, резкой изменчивостью фильтрационно-емкостных свойств (ФЕС) продуктивных горизонтов по площади и разрезу из-за невыдер-

жанности литологического состава коллекторов, их засалонения и полного выклинивания [1–3].

Кроме того, залежи продуктивных горизонтов отличаются различным фазовым состоянием и, по-видимому, представляют единую флюидодинамическую систему нефтегазообразования, в основе которой лежит представление о единстве триады: очаг генерации, пути миграции и зоны аккумуляции углеводородов [4]. Тектонические разломы различной кинематики и масштабов, образующие сложную систему блоков, оказывают непосредственное воздействие на онтогенез углеводородов через структурный, вещественный и флюидодинамический контроль, который закономерно изменяется во времени и пространстве. По данным сейсморазведочных работ, разрывные нарушения осложняют структурные планы поверхности фундамента и осадочного чехла. Часть из них прослеживается только в подсолевой и солевой областях разреза, другая часть затрагивает весь разрез.

Самая длительная активизация разломов, как отмечает Л.А. Барышев [1], прошла в пермо-триасовое время и отличалась массо-



вым внедрением трапповых интрузий [5, 6]. Среди выделенных разрывных нарушений наиболее высокими амплитудами смещения отличаются Могинско-Ленский разлом, Верхнечонско-Талаканский и Усольский грабены (рис. 1). Наиболее крупный разлом субширотного простирания – Могинско-Ленский – пересекает все месторождение, разделяя его на «центральный» северо-западный и северо-

восточный блоки, сопровождается внедрениями даек траппов и незначительными по протяженности оперяющими разломами (см. рис. 1). Разломы, ограничивающие северо-западное окончание Верхнечонско-Талаканского грабена, рассекающего северо-восточную часть месторождения, имеют вертикальное смещение по породам фундамента до 100 м, по терригенному комплексу венда – около 20 м.

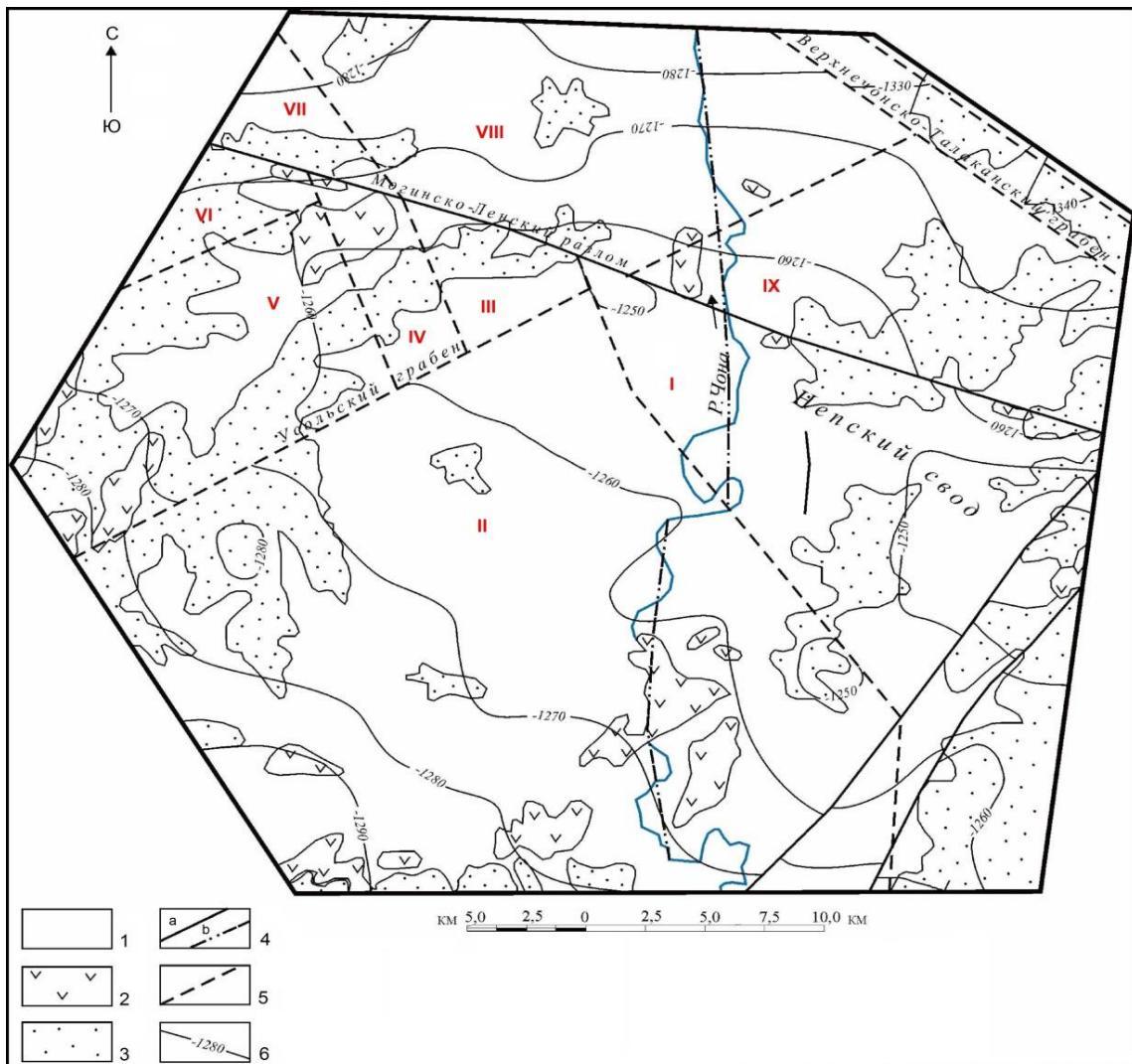


Рис. 1. Схематическая тектоническая карта разломов и разломных блоков Верхнечонского нефтегазоконденсатного месторождения:

1–3 – структурные этажи: 1 – нижнепалеозойский, 2 – верхнепалеозойско-триасовый (лавовая и интрузивная субфация), 3 – юрский; 4 – разломы, выходящие на поверхность: а – установленные; б – предполагаемые; 5 – допозднепалеозойские разломы фундамента; 6 – изогипса по поверхности фундамента и ее абсолютная отметка, м;

Римскими цифрами I–IX обозначены разломные блоки

Fig. 1. Schematic tectonic map of the faults and fault blocks of the Verkhnechonsky field:

1–3 – structural levels: 1 – Lower Paleozoic, 2 – Upper Paleozoic-Trias (lava and intrusion subdacies), 3 – Jurassic; 4 – outcropping faults: a – established; b – prospective; 5 – Pre-Late Paleozoic bed faults; 6 – isohypse on the bed surface and its absolute depth mark, m

Roman figures I–IX designate the fault blocks



Процесс внедрения траппов служит причиной вторичного засалонения терригенных коллекторов. Анализ результатов исследования керна показывает, что засалонению подверглись все литологические разности продуктивного разреза. Наибольшая степень засалонения характерна для крупнозернистых пород, имеющих наилучшие ФЕС: гравийных конгломератов и крупнозернистых песчаников.

Факторами вторичного галитообразования могли служить давление и температура при внедрении трапповых интрузий, вызвавших тепловой массоперенос галита подземными рассолами из вышележащих соленосных отложений [7]. Присутствие галита в поровом пространстве – одна из главных причин неоднородности коллекторских свойств пласта, поскольку его возможное последующее вымывание приводит к повышению пористости в 2–2,5 раза и увеличению проницаемости в сотни раз.

По результатам исследований А.В. Хоменко, в узких экзоконтактовых зонах температуры нагревания осадочных пород под воздействием траппов достигали 700 °C, постепенно уменьшаясь по мере удаления от интру-

зива, причем градиент падения температуры зависит от мощности интрузива и термодинамических параметров осадочных пород [7].

ВЧНГКМ является многозалежным месторождением с залежами структурно-литологического типа, элементами стратиграфического и литологического выклинивания и тектонического экранирования [8]. Относительно несложная морфоструктура залежей диктуется распределением коллекторов и неколлекторов и, как правило, зависит не только от литологического состава последних, но и от существования отдельных блоков залежей.

В разрезе осадочной толщи ВЧНГМ выявлен ряд продуктивных горизонтов, имеющих региональное распространение с доказанной нефтегазоносностью: верхнечонский, преображенский, усть-кутский и осинский (рис. 2).

Промышленная нефтегазоносность месторождения связана с песчаниками верхнечонского горизонта (пласти VCh_1 , VCh_2 , VCh_{1+2}) терригенного комплекса нижнемотской подсвиты венда, карбонатами преображенского горизонта среднемотской подсвиты венда и осинским горизонтом усольской свиты нижнего кембрия.

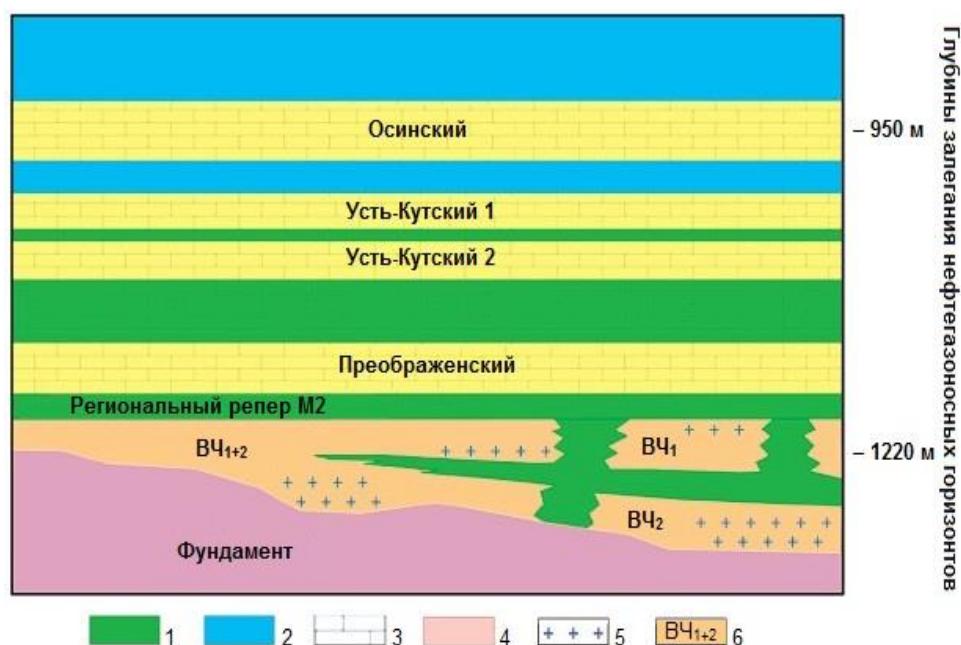


Рис. 2. Продуктивные (целевые) горизонты Верхнечонского нефтегазоконденсатного месторождения:
1 – неколлекторы; 2 – соль; 3 – карбонаты; 4 – терригенные отложения;
5 – зона засалонения песчаника; 6 – верхнечонский горизонт
Fig. 2. Producing (target) horizons of the Verkhnechonsky field:
1 – non-collectors; 2 – salt; 3 – carbonates; 4 – terrigenous sediments;
5 – sandstone salinization zone; 6 – Verkhnechonsky horizon



Осинский горизонт – пачка карбонатных пород в нижней части усольской свиты, сложенных водорослевыми, органогенными известняками и доломитами, прослойми засоленных пород и солями. Он характеризуется широким площадным распространением с изменением мощности с юго-востока на северо-запад от 41 до 54 м. Эффективная мощность его колеблется от 0 до 21 м, в залежи – от 6 до 17 м. Открытая пористость составляет 6–16 %, проницаемость достигает 160 мД. Тип коллектора – трещинно-поровый. Залежь осинского горизонта – газовая, пластовая, литологически экранированная со всех сторон непроницаемыми породами.

Усть-кутский горизонт, из которого в отдельных скважинах получены притоки углеводородов, относится к потенциально продуктивным. Его особенностью является весьма низкая проницаемость нефтеносных отложений и широкое распространение постседиментационных процессов, формирующих неоднородность ФЕС. Горизонт залегает на различных глубинах на породах преображенского горизонта и перекрывается кембрийскими отложениями осинского горизонта, его толщина варьирует от 28 до 77,63 м. В составе горизонта выделены два пласта: верхний – УК₁ и нижний – УК₂.

Пласт УК₁ сложен перекристаллизованными реликтово-органогенными и зернистыми доломитами. Эффективные толщины варьируют от 0,7 до 18,4 м. Коллектор – низко- и среднеемкий, с отдельными тонкими прослойями пород – высокоемкий, с пористостью 6–13,1 %, реже 16,3–19,7 %, газопроницаемостью 0,1–63,1·10⁻³ мкм², редко 134,8–471,7·10⁻³ мкм². Среднеарифметические значения пористости низкие – 1,1–8,5 %, газопроницаемости – 0,1–1,98·10⁻³ мкм². Флюидоупором верхнего пласта являются галогенно-карбонатные отложения усольской свиты. Перемычка, выполняющая роль флюидоупора для нижнего усть-кутского пласта, представлена в основном доломитангидритовыми и ангидрит-доломитовыми породами, доломитами глинистыми, реже аргиллитами.

Пласт УК₂ сложен доломитами реликтово-органогенными, водорослевыми, реже хемогенными и органогенно-обломочными. Встре-

чаются кавернозно-пористые разности. Каверны и поры заполнены галитом, ангидритом, реже они пропитаны нефтью. Коллектор пласта УК₂ – низко- и среднеемкий с пористостью до 6–15 %, газопроницаемостью до 6–59,3·10⁻³ мкм², в единичных случаях до 135–815·10⁻³ мкм². Эффективные толщины – 0–14,4 м.

Преображенский горизонт представлен монолитной пачкой серых трещиноватых доломитов органогенного, обломочного и хемогенного генезиса, глинистых в кровле и подошве, частично засоленных, с низкой пористостью и проницаемостью. Мощность горизонта изменяется от 15,5 до 22 м, мощность коллектора – до 17 м. Залежь преображенского горизонта – нефтяная, пластовая, структурно-литологическая, высотой до 90 м в центральном блоке и до 30 м в северо-западном и северо-восточном блоках. На юге, западе и частично на севере залежь ограничена линией замещения коллектора плотными породами, в северо-восточном блоке – положением водонефтяного контакта (ВНК) на абсолютной отметке -1256 м, в северо-западном блоке – гипсометрическим уровнем ВНК на абсолютной отметке -1208 м. На востоке центрального блока граница залежи пока не установлена. Пористость коллектора на залежи составляет 6,5–17 %, проницаемость – 0,18–22 мД.

Покрышка преображенского горизонта сложена в основном глинистыми доломитами толщиной до 3 м, перекрытыми тонкослоистыми доломитами с прослойями доломито-ангидритов и глинистых доломитов толщиной до 60 м. Коллекторские свойства глинистых доломитов низкие: пористость составляет 3–7 %, проницаемость отсутствует. Надежность покрышки повышает сочетание глинистых доломитов с сульфатно-карбонатными породами.

Основной интерес как объект промышленной эксплуатации, где сосредоточено 82 % извлекаемых запасов месторождения, в том числе 72 % запасов категории С₁, представляет верхнечонский горизонт, отличающийся резкой фациальной неоднородностью продуктивных пластов. Верхнечонский горизонт залегает на относительно небольшой глубине и характеризуется небольшой мощностью –



менее 10 м. Из-за отложений минеральных солей коллектор неоднороден по проницаемости, поэтому его эффективная нефтенасыщенная мощность еще больше сокращается и составляет всего 3 м. Горизонт сложен терригенными отложениями, в основном песчаниками, и состоит из двух пластов: верхнего – ВЧ₁ (или В10 в соответствии с региональной индексацией) и нижнего – ВЧ₂ (или В13) – толщиной 2,2–26 и 5,5–20,2 м соответственно. Пласти разделены перемычкой, служащей покрышкой – алеврито-аргиллитовой пачкой толщиной 1,4–24 м, которая закономерно уменьшается в северо-западном направлении и полностью выклинивается при слиянии пластов ВЧ₁ и ВЧ₂.

Для более надежного выделения коллекторов и определения эффективных толщин разработчики ввели дополнительные критерии, позволяющие дифференцировать литолого-стратиграфический разрез на прослои аргиллитов и песчаников. Для этой цели наиболее информативным оказался метод акустического каротажа, определяющий интервальное время прохождения продольной волны по породе (время пробега волны на единицу длины) Δt , мкс/м [9]. Пласти аргиллитов в разрезе скважин обычно выделяются наиболее высокими значениями интервального времени (выше 260 мкс/м), высокопористые пласти песчаников также характеризуются высокими значениями Δt . Пласти ВЧ₁ и ВЧ₂ представляют единую гидродинамически связанную систему, что дает основание при разработке рассматривать оба пласта в качестве единого объекта.

Залежь пласта ВЧ₂ (или В13) – нефтяная, в северо-западном блоке – газонефтяная, пластовая, структурно-литологическая, высота ее достигает 22 м, увеличиваясь в центральном блоке до 65 м, в том числе высота газовой шапки составляет 12 м. Судя по положению ВНК в северо-западном блоке по сравнению с северо-восточным, залежь по линии разлома опущена на 32 м. С юга, запада и востока она ограничена литологическим экраном непроницаемых песчаников или контролируется их полным выклиниванием.

Залежь пласта ВЧ₁ – структурно-литологическая, пластовая, газонефтяная в централь-

ном блоке, нефтяная в северо-западном блоке и газоконденсатная в северо-восточном блоке. В центральном блоке залежь разделена толщей непроницаемых песчаников на две части – западную и восточную, в каждой из которых расположена газовая шапка. В разных частях центрального блока, судя по положению газонефтяного контакта (ГНК), который находится на абсолютной отметке -1243 м в западной части и -1215 м в восточной части блока, залежь опущена на 28 м. Высота залежи составляет 56 м, в том числе 21 м газовой части, и меняется в разных блоках от 9 до 40 м. Границами залежи служат линии выклинивания коллектора на востоке, юге и западе. Эффективность нефте- и газонасыщения резко меняется в зависимости от изменения пористости и проницаемости коллекторов продуктивного верхнечонского горизонта (ВЧ₁₊₂) (рис. 3, 4).

Положения ГНК и ВНК, установленные по данным испытания скважин, для отдельных залежей верхнечонского горизонта соответственно изменяются от -1215 до -1260,5 м и от -1254 до -1283 м. Разделение пластов на газо- и нефтенасыщенные производилось по их местоположению относительно установленных ГНК (таблица).

В настоящее время на месторождении выявлено 18 залежей нефти и газа, из них 10 – в песчаниках верхнечонского горизонта, 4 – в доломитах преображенского горизонта и 4 – в карбонатах осинского горизонта.

Различие в фазовых состояниях залежей, обусловленное тектоногидротермальной активизацией, требует дополнительных исследований, так как в зонах глубинных разломов нефтегазоносных бассейнов наблюдается резкое несоответствие границ между градациями катагенеза органического вещества и стадиями изменения пород [10].

Система разработки любого месторождения должна учитывать особенности его структурно-тектонического, литолого-фациального строения и отвечать конкретным технико-экономическим требованиям, предъявляемым к бурению и эксплуатации скважин. В связи со сложностью геологического строения ВЧНГМ в процессе его разработки при выделении эксплуатационных объектов следует опираться

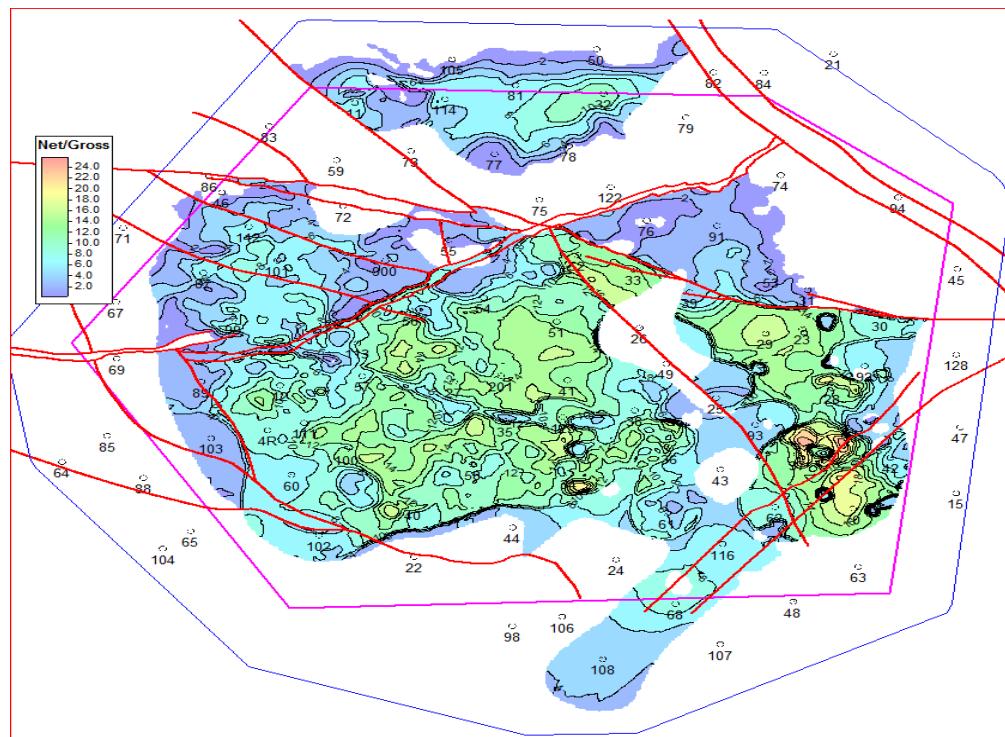


Рис. 3. Карта эффективных нефтенасыщенных толщин

продуктивного верхнечонского горизонта (ВЧ₁₊₂)

Fig. 3 Map of effective oil-saturated thicknesses of the producing Verkhnechonsky horizon (VCH₁₊₂)

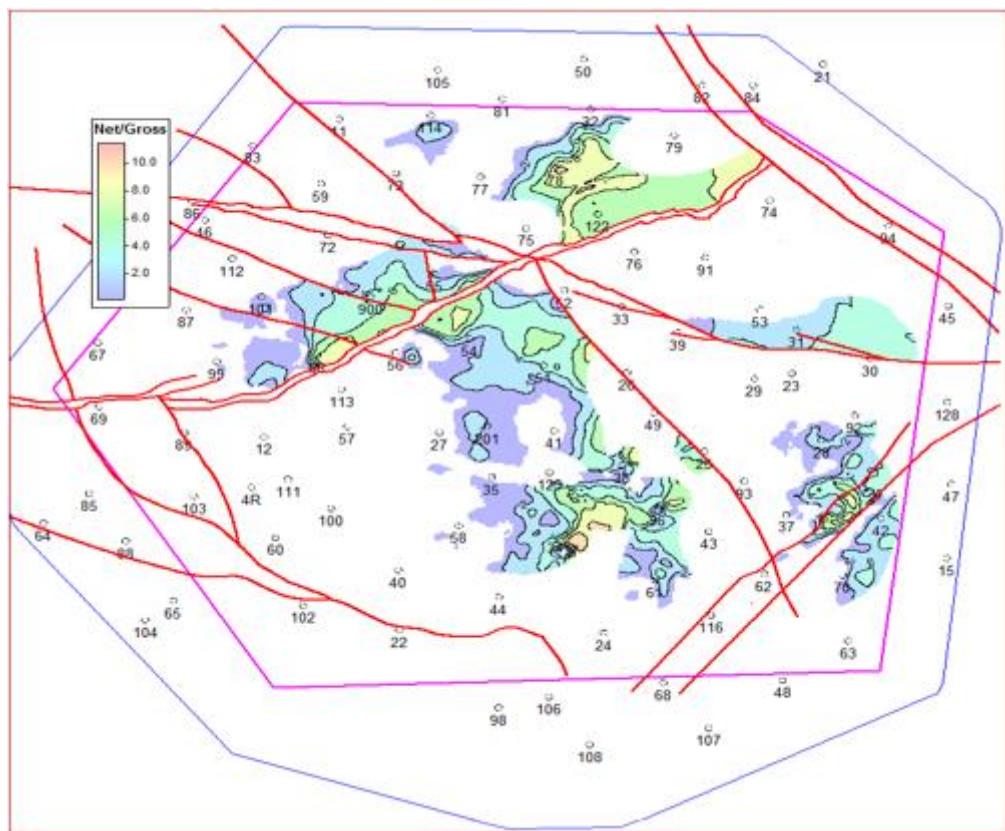


Рис. 4. Карта эффективных газонасыщенных толщин продуктивного верхнечонского горизонта (ВЧ₁₊₂)

Fig. 4. Map of effective gas-saturated thicknesses of the producing Verkhnechonsky horizon (VCH₁₊₂)



Типы залежей
Types of deposits

Блок	Пласт	Район скважин	Тип залежи по насыщению*	Газонефтяной контакт, м	Принятый газонефтяной контакт для блока, м
I	ВЧ ₁	23.29	Нефтяная	–	–
	ВЧ ₁	37.42	Нефтяная с газовой шапкой	-1215	-1215
	ВЧ ₂	23.29	Нефтяная	–	–
	ВЧ ₁₊₂	32.52	Нефтяная с газовой шапкой	-1236	–
II	ВЧ ₁	38.41	Нефтяная с газовой шапкой	-1244	-1240
	ВЧ ₁	34	Нефтяная с газовой шапкой	-1238	–
	ВЧ ₁	61	Нефтяная с газовой шапкой	-1227	–
	ВЧ ₂	68.116	Нефтяная	–	–
	ВЧ ₂	34.123	Нефтяная	–	–
	ВЧ ₁₊₂	12.54	Нефтяная с газовой шапкой	-1244	–
III	ВЧ ₁₊₂	55	Нефтяная с газовой шапкой	-1241	–
IV	ВЧ ₁₊₂	900	Нефтяная с газовой шапкой	-1248	–
V	ВЧ ₁₊₂	87.66	Нефтяная с газовой шапкой	-1253	–
VIII	ВЧ ₁₊₂	122.78.114	Нефтяная с газовой шапкой	-1261	–
IX	ВЧ ₁	31	Газовая залежь	–	–

Примечание. * – все залежи пластовые, литологически и тектонически экранированные.

Note. * – all deposits are bedded and lithologically and tectonically screened.

на следующие особенности геолого-физических характеристик:

- блоковое строение месторождения (см. рис. 1);
- взаиморасположение продуктивных горизонтов по разрезу;
- наличие надежных плотных разделов (покрышек) между продуктивными горизонтами;
- типы коллекторов, их литолого-физические характеристики;
- состав пластовых вод продуктивных горизонтов;
- фазовый состав флюидов в залежах.

При разработке месторождения углеводородов одной из основных задач является выбор системы расположения скважин и порядок разработки продуктивных горизонтов [11]. По мере изучения и уточнения особенностей сложного геологического строения ВЧНГМ менялись планы и методы его разработки. На начальных этапах разработка велась с помощью вертикальных скважин, но по причине малой эффективной мощности основного продуктивного верхнечонского горизонта они не отличались высокой продуктивностью.

В 2007 г. с учетом сложности тектонического блокового строения ВЧНГМ, количества и линейных размеров залежей, вторичной засоленности и анизотропии коллекторов

ОАО «Верхнечонскнефтегаз» был предложен новый план разработки месторождения. Этот план предусматривал бурение не вертикальных, а наклонно-направленных и горизонтальных скважин с отходом от вертикали 500–1000 м и горизонтальным заканчиванием до 1 км в каждом отдельном тектоническом блоке при наличии хороших экранирующих свойств тектонических нарушений, разделяющих эти блоки. При значительной анизотропии пласта наилучшим является положение ствола горизонтальной скважины посередине между кровлей и подошвой продуктивного пласта.

В зонах ГНЗ наилучшим является положение ближе к подошве при отсутствии водонефтяной зоны.

Благоприятными факторами применения такой системы разработки горизонтальными скважинами являются:

- продуктивные пласти малой толщины (до 10 м);
- низкая степень расчлененности (менее 3–5);
- низкий коэффициент послойной анизотропии (менее 5–10);
- высокая степень коэффициента песчанистости (менее 0,5);
- низкопроницаемые коллекторы (до 0,05 мкм²).



По проекту опытно-промышленной эксплуатации ВЧНГКМ ОАО «Верхнечонскнефтегаз» для наиболее разведанных залежей верхнечонского горизонта (ВЧ₁) I и II блоков были разработаны два варианта равномерных сеток наклонно-направленных и горизонтальных скважин с площадным заводнением:

– 1-й вариант – размещение скважин по 7-точечной сетке с расстояниями между скважинами 500 м и плотностью 0,7 км²/скв. с возможным последующим уплотнением сетки (рис. 5, а);

– 2-й вариант – размещение скважин по 7-точечной сетке с расстояниями между скважинами 1100 м (рис. 5, б).

План размещения по редкой сетке с расстоянием между скважинами 1100 м позволил детализировать строение продуктивных пластов верхнечонского горизонта, уточнить границы зон замещения и выклинивания терригенных пластов-коллекторов.

Естественный режим может обеспечить эффективный процесс разработки в том случае, если площадь залежи небольшая – менее 10 км², а доля непрерывной части продуктивного пласта – не менее 75 долей площади. Этим критериям ВЧНГМ не соответствует: площадь месторождения по базисному продуктивному горизонту составляет 1500 км²,

а залежи относятся к литологически и тектонически экранированным типам. Кроме того, наблюдается хорошая сообщаемость залежи с контурной областью нефтегазонасыщенности. Поэтому основная добыча нефти должна проводиться главным образом при режиме вытеснения нефти водой.

Из-за неэффективности естественных режимов разработки основным методом вытеснения углеводородов в качестве системы поддержания пластового давления предлагается метод контурного заводнения. Но если основная добыча будет вестись главным образом при режиме вытеснения нефти водой, первоочередной проблемой станут процессы вторичного засалонения коллекторов, что находится в прямой зависимости от состава жидкости, закачиваемой в продуктивный пласт [12, 13]. Вода для заводнения должна соответствовать действующему отраслевому стандарту ОСТ 39-225-88 «Вода для заводнения нефтяных пластов. Требования к качеству».

Засалонение порового пространства – это вторичный процесс, который активизируется при возобновляющейся тектонической деятельности. Кроме того, засалонение пор может происходить не только при изменении температуры и давления (хотя это является

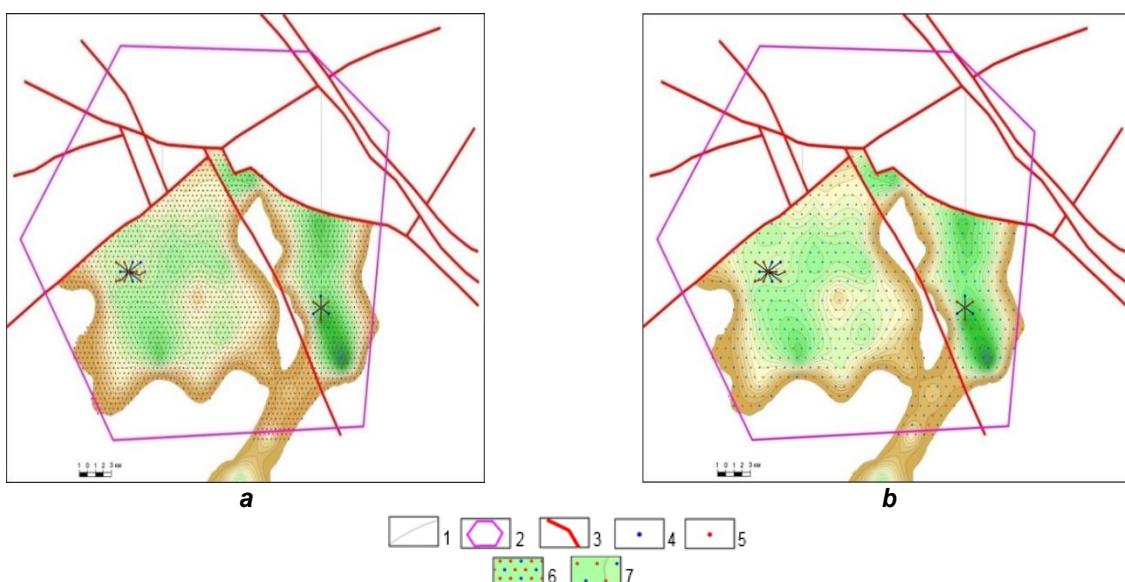


Рис. 5. Размещение скважин по варианту 1 (а) и 2 (б):
1 – линии эффективных толщин; 2 – границы лицензионного участка; 3 – разломы;
4 – нагнетательные скважины; 5 – добывающие скважины;
6, 7 – разница в расстоянии между скважинами

Fig. 5. Location of wells in options 1 (a) and 2 (b):
1 – effective thickness lines; 2 – license block boundaries; 3 – faults;
4 – injection wells; 5 – producers; 6, 7 – distance between the wells



основной причиной), но и в процессе смешения пластовых вод разного состава при нарушении парциального равновесия содержания солей в силу каких-либо причин. Засолонение коллекторов в продуктивных и возможно продуктивных пластах является важнейшим фактором, определяющим локализацию углеводородных скоплений, методику поисково-разведочных работ и их геолого-экономическую эффективность [14]. В связи с вторичным заполнением порового пространства терригенного коллектора галитом, реже ангидритом и карбонатом в продуктивных горизонтах присутствуют целики, лишенные удовлетворительных ФЕС.

Процессы вторичного засолонения коллекторов пластов ВЧ₁ и ВЧ₂ изучались В.С. Богдановым, В.А. Качиным, В.И. Рыжковым и другими исследователями. Применение метода заводнения диктует жесткие требования к составу жидкости, закачиваемой в продуктивный пласт. В то же время коллекторы ВЧНГМ подвержены процессам вторичного засолонения, что является одной из важнейших причин, определяющих локализацию углеводородов. Метод заводнения может привести к растворению кристаллического галита в поровом пространстве коллекторов, резкому увеличению их эффективной пористости и проницаемости и, как следствие, к изменению солевого состава пластовых вод [15].

Кроме того, развитие процессов вторичного засолонения коллекторов продуктивных горизонтов приводит к образованию целиков с низкими ФЕС. Влияние процессов растворения галита на динамику вытеснения нефти водой изучалось в Татарском научно-иссле-

довательском и проектном институте нефти (г. Бугульма), для чего проводились лабораторные исследования на насыпных пористых средах. Анализ полученных результатов дал основание для следующих выводов: засолонение пород значительно уменьшает коэффициент вытеснения нефти водой по сравнению с бессолевыми пористыми средами. При 20–30 %-м содержании галита коэффициент вытеснения снижается в 1,5 раза; при 50 %-м содержании – в 2–6 раз по сравнению с бессолевыми средами.

Так как подсолевые толщи в нефтегазоносных комплексах юга Сибирской платформы не содержат первичных солей, которые могли бы служить поставщиком галита в рассолы, причиной засолонения могло быть тепловое воздействие траппов, спровоцировавшее конвективный перенос галита подземными рассолами из вышележащих соленосных отложений [15]. Этот процесс на сегодняшний день стабилизировался, а при вскрытии идет обратный процесс из-за разности напоров. Присутствие галита в поровом пространстве – главная причина неоднородности коллекторских свойств пласта, поскольку его вымывание из образцов керна приводит к повышению пористости в 2–2,5 раза и к увеличению проницаемости в сотни раз [16]. Данные, наглядно демонстрирующие масштаб процесса засолонения продуктивных горизонтов, приведены на рис. 6.

Существует еще одна проблема при бурении скважин в мощных солевых толщах – флюидоупорах: бурение нередко осложняется из-за высоконапорных фонтанов внутрисолевых рассолов, отличающихся высокими дебитами

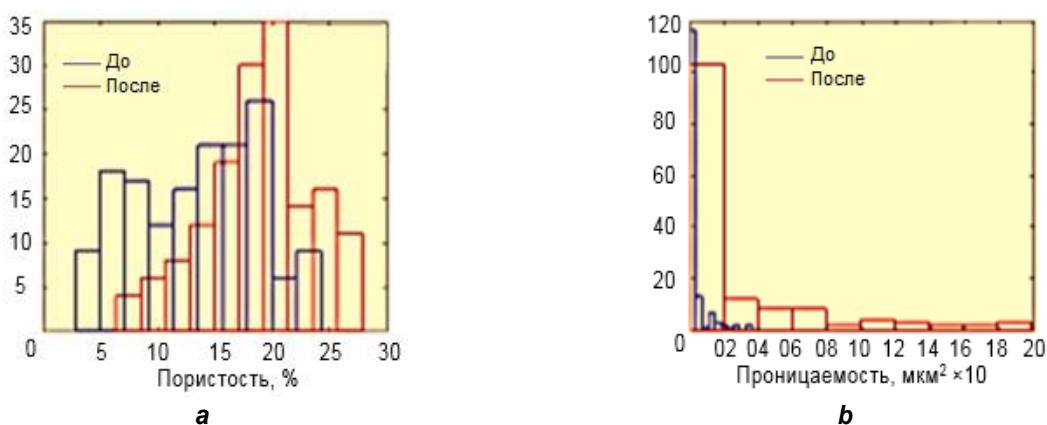


Рис. 6. Гистограммы пористости (а) и проницаемости (б) до и после отмывки керна от соли [16]
Fig. 6. Histograms of porosity (a) and permeability (b) before and after washing the salt off the core [16]



до 7000 м³/сут. с аномально высокими пластовыми давлениями и высокой минерализацией рапы более 500 кг/м³, преимущественно хлоридно-кальциевого и магниево-кальциевого состава [17–19]. Пластовые воды преображенского, верхнечонского горизонтов характеризуются высокой минерализацией, что было установлено при исследовании их состава, физико-химических свойств и характера взаимодействия с вмещающими породами (водорастворимыми минералами в пласте-коллекторе, глинистым цементом). В солевом составе вод преобладают хлориды кальция (CaCl₂), натрия (NaCl), магния (MgCl₂), калия (KCl). Содержание сульфатов кальция (CaSO₄), бикарбонатов натрия (NaHCO₃) значительно меньше. Причем доля CaCl₂ и NaCl в общем солевом составе занимает 85–95 %. По преобладанию в составе CaCl₂ или NaCl выделяются два типа пластовых вод:

- хлоридно-кальциевые с высоким содержанием CaCl₂ (19–26 %) и более низким содержанием NaCl (0,1–6,1 %);
- хлоридно-натриевые с высоким содержанием NaCl (8,7–18,3 %) и более низким содержанием CaCl₂ (3,9–13,9 %).

Результаты исследования и их обсуждение

Накопление сведений о геологическом строении ВЧНГКМ и уточнение его особенностей привели к закономерным изменениям системы его разработки. Так, новая методика компании Schlumberger заменила использование забойного двигателя на использование роторно-управляемой системы, менялись и методы заводнения. Рекомендуемые методы заводнения требовали особо подробных исследований по изучению литологических особенностей продуктивного верхнечонского горизонта и состава вод, применяемых для заводнения при эксплуатации.

При исследовании было установлено, что в солесодержащих породах коэффициент вытеснения нефти водой по сравнению с бессолевыми пористыми средами уменьшается. Так, при 20–30 %-м содержании соли коэффициент вытеснения снижается в 1,5 раза; при 50 %-м содержании соли – в 2–6 раз по сравнению с бессолевыми средами. При примене-

нии для заводнения высокоминерализованных (пластовых) вод количество выщелачиваемого галита уменьшается в 10 и более раз, а выщелачивание ангидрида исключается полностью. Подвижность пресной воды после фильтрации ее в количестве 7–10 объемов пор через пористые среды с содержанием 10–50 % соли увеличивается от 3,4 до 118 раз по сравнению с подвижностью воды в пористой среде, не содержащей соли. Следовательно, эффективность заводнения солесодержащих пород зависит от степени заполнения пор солью, от коэффициента засоленности пород по толщине и от выщелачивающей способности реагентов.

В связи с этим для заводнения разрабатываемого горизонта рекомендуется применять воды, близкие по составу, что имеет целый ряд преимуществ:

- они совместимы с пластовыми водами продуктивных отложений;
- не выщелачивают водорастворимые минералы (галит и ангидрит).

Наиболее близки по химическому составу к пластовым водам продуктивных горизонтов пластовые воды бельской свиты (атовского и христофоровского горизонтов). Эти пластовые воды и могут быть использованы для заводнения.

Нефть и пластовые воды пластов ВЧ₁ и ВЧ₂ верхнечонского горизонта по своим свойствам и составу идентичны. Пласти, по-видимому, гидродинамически связаны в пределах блоков, что дает основание рассматривать оба пласта в качестве единого эксплуатационного объекта.

Коллекторы преображенского горизонта представлены трещиноватыми доломитами, глинистыми в кровле и подошве, частично засоленными, с проницаемостью 0,18–22 мД, а коллекторы пласта верхнечонского горизонта – кварцевыми песчаниками с проницаемостью до 700 мД. Они могут существенно отличаться по продуктивности, пластовому давлению в процессе их разработки и, следовательно, по способам эксплуатации скважин, скорости выработки запасов нефти и изменению обводненности продукции. Поэтому объединять такие пласти в один объект разработки оказывается нецелесообразным.



Представленный ранее план бурения с применением забойного двигателя и гамма-каротажа не обеспечивал проводку стволов по наиболее продуктивным участкам пласта, и поэтому дебиты некоторых наклонно-направленных и горизонтальных скважин оказались недостаточно высокими. С целью увеличения эффективности бурения специалисты департамента буровых работ ОАО «Верхнечонскнефтегаз» совместно со специалистами департамента по геологии и разработке месторождений компании Schlumberger предложили новую методологию, позволяющую повысить эффективность бурения за счет использования роторно-управляемой системы, каротажа во время бурения и геонавигации. Такое сочетание технологий роторно-управляемой системы и каротажа во время бурения дает возможность обеспечения необходимого контроля траектории скважины и получения важной информации о геофизических свойствах пород, а применение геонавигации приведет к увеличению продуктивности каждой скважины более чем в два раза [20].

Кроме того, компанией Schlumberger совместно с Тюменским нефтяным научным центром в 2021 г. планируется бурение опытного куста для целей поддержания пластового давления с тестированием технологии закачки газа. В технологии заканчивания рассматривается бурение горизонтальных скважин с длиной горизонтального участка 1000 м и проведением 9-стадийного гидроразрыва пласта,

а также многозабойных скважин с общей проходкой более 6000 м.

Также в течение следующих двух лет планируется реализация некоторых важных изменений, которые были бы невозможны без использования технологии роторно-управляемой системы:

- увеличение длины скважины по стволу свыше 3600 м;
- пилотный проект бурения скважин с большим отходом от вертикали (на 1500 м горизонтальной скважины – 152,4 мм отход секции);
- сокращение числа кустов путем увеличения отхода стволов скважин от вертикали.

Как подчеркивают специалисты, несмотря на то, что ранее технологии роторно-управляемой системы и каротажа во время бурения предназначались для дорогостоящего морского бурения, они доказали свою экономическую эффективность и на наземных проектах.

Заключение

Из вышесказанного можно сделать вывод о том, что по мере уточнения особенностей сложного геологического строения ВЧНГКМ, изучения анизотропии ФЕС и толщин продуктивных горизонтов по разрезу, степени их засолонения, полного выклинивания, состава и минерализации пластовых вод изменялась и совершенствовалась система разработки месторождения с целью рационального сокращения сроков бурения и увеличения показателя максимальной конечной нефтеотдачи.

Библиографический список

1. Барышев Л.А., Барышев А.С. Многопараметровая физико-геологическая модель Верхнечонского газоконденсатно-нефтяного месторождения // Геология нефти и газа. 1990. № 4. С. 46–54.
2. Лёвин Ф.Д. Объемная геолого-геофизическая модель Верхнечонского месторождения углеводородов // Современные аэрогеофизические методы и технологии: сб. статей / науч. ред. П.С. Бабаянц, В.А. Буш. Вып. 1. Т. 1. М.: Изд-во АО «ГНПП «Аэрогеофизика», 2009. С. 199–225.
3. Жарков А.М., Ануприенко А.А. Влияние блоковых перемещений фундамента на строение и нефтегазоносность базальных отложений осадочного чехла // Блоковое строение земной коры и нефтегазоносность: докл. Междунар. конф. СПб.: Изд-во ВНИГРИ, 1994. С. 73–76.
4. Дьяконов А.И., Белый Н.И. Тектонодинамические критерии раздельного прогноза нефтегазоносности. М.: Изд-во ВНИИОЭНГ, 1993. 125 с.
5. Гажула С.В. Особенности траппового магманизма в связи с условиями нефтегазоносности Сибирской платформы // Нефтегазовая геология. Теория и практика. 2008. Т. 3. № 1. С. 1–8.
6. Одинцова Т.В., Дробот Д.И. Трапповый магманизм и нефтегазоносность вендинского терригенного комплекса Приленского нефтегазоносного района // Геология нефти и газа. 1983. № 7. С. 6–10.
7. Хоменко А.В. Влияние трапповых силлов на структуры осадочного чехла Тунгусской синеклизы // Труды Института геологии и геофизики. Вып. 728. Тектоника платформенных областей / отв. ред. О.А. Вотах, В.А. Соловьев. Новосибирск: Наука, 1988. С. 66–10.
8. Берзин А.Г., Рудых И.В., Берзин С.А. Особенности формирования многопластовых залежей углеводородов месторождений Непско-Ботубинской антеклизы // Геология нефти и газа. 2006. № 5. С. 14–21.
9. Vakhromeev A.G., Ivanishin V.M., Siraev R.U.,



- Raziapov R.K., Sverkunov S.A. Circulation loss in drilling of Riphean reservoirs at the south Tambei oil-gas-condensate field: applied and theoretical aspects // 3rd EAGE International GeoBaikal conference. Irkutsk, 2014. P. 1–6.
10. Коробов А.Д., Коробова Л.А., Ахлестина Е.Ф. Минералогические и палеогеотермические критерии нефтегазоносности рифтогенных осадочных бассейнов // Известия Саратовского университета. Новая серия. Серия: Науки о Земле. 2009. Т. 9. № 2. С. 28–35.
11. Анульев Д.А., Гладков А.В., Игнатьев Н.А., Чупров А.А., Мусин Р.А., Баянов В.А. Мониторинг разработки Верхнечонского нефтегазоконденсатного месторождения // Научно-технический вестник ОАО «НК «Роснефть». 2016. № 2. С. 56–59.
12. Вахромеев А.Г., Мышевский Н.В., Хохлов Г.А. Аномально-высокие пластовые давления как фактор, осложняющий освоение углеводородных месторождений Восточной Сибири // Современная геодинамика и опасные природные процессы в Центральной Азии: фундаментальный и прикладной аспекты: материалы Всерос. совещ. Вып. 5. Иркутск: Изд-во ИЗК СО РАН, 2006. С. 98–119.
13. Alexeeva L., Alexeev S., Vakhromeev A. Siberian Platform hydromineral resources: an updated analysis // MinWat-14, Mineral waters: genesis, exploitation, protection and valorisation. Karlovy Vary, 2014. P. 14–15.
14. Auzina L.I., Parshin A.V. System-intergrated GIS-based approach to estimating hydrogeological conditions of oil-and gas fields in Eastern Siberia // IOP Conference. Series: Earth and Environmental Science. 2016. Vol. 33. P. 012060. <https://doi.org/10.1088/1755-1315/33/1/012060>
15. Шубин А.В., Рыжков В.И. Изучение эффекта засоления порового пространства терригенного коллектора по сейсмическим данным // Геофизика. 2013. № 5. С. 17–25.
16. Рапацкая Л.А., Николаева Л.В., Васенёва Е.Г. Особенности литолого-фациального строения рапоносного продуктивного осинского горизонта и проблема утилизации буровых растворов // Вестник Иркутского государственного технического университета. 2015. № 3 (98). С. 103–105.
17. Вахромеев А.Г., Хохлов Г.А. Перспективы прогноза рапопроявлений в Верхоленском, Жигаловском газоносном районе Иркутской области // Особенности технологии проводки и заканчивания скважин в Восточной Сибири и Якутии: сб. науч. трудов. Новосибирск: Изд-во СНИИГГиМС, 1988. С. 140–142.
18. Рапацкая Л.А., Николаева Л.В., Васенёва Е.Г. Утилизация буровых растворов на Ковыктинском газоконденсантном месторождении в связи с проблемами экологии // Новые идеи в науках о Земле: материалы VIII Междунар. конф. М., 2007. С. 225–227.
19. Rapatskaya L.A., Tonkikh M.E., Ustyuzhanin A.O. Natural reservoir as a geological body for storing helium reserves // IOP Conference. Series: Earth and Environmental Science. 2020. Vol. 408. P. 012060. <https://doi.org/10.1088/1755-1315/408/1/012060>
20. Уилсон К., Шокарев И., Смолл Дж., Ахундов Э. Результаты применения новых технологий в бурении при разработке сложного месторождения Восточной Сибири – Верхнечонского нефтегазоконденсатного месторождения // Нефтегазовая вертикаль. 2011. № 2. С. 54–55.

References

1. Baryshev LA, Baryshev AS. Multiparametric physical-and-geological model of the Verkhnechonsky oil and gas condensate field. *Geologiya nefti i gaza = Russian Oil and Gas Geology*. 1990;4:46–54. (In Russ.)
2. Levin FD. Volumetric geological-and-geophysical model of the Verkhnechonsky hydrocarbon field. In: Babayants PS, Bush VA (eds.). *Sovremennye aerogeofizicheskie metody i tekhnologii = Modern aerogeophysical methods and technologies*. Iss. 1. Vol. 1. Moscow: JSC “Geophysical research-and-production enterprise ‘Aerogeofizika’”, 2009. p.199–225. (In Russ.)
3. Zharkov AM, Anuprienko AA. Influence of block movements of the foundation on the structure and oil and gas content of basal deposits of the sedimentary cover. In: *Blokovoe stroenie zemnoi kory i neftegazonosnosti: doklady Mezhdunarodnoi konferentsii = Block structure of the earth's crust and oil and gas content: proceedings of the International conference*. Saint Petersburg: All-Russia Petroleum Research Exploration Institute; 1994. p.73–76. (In Russ.)
4. D'yakonov AI, Belyi NI. *Tectonic-dynamic criteria for a separate forecast of oil and gas content*. Moscow: All-Russian Scientific Research Institute of Petroleum Industry Organization, Management, and Economics; 1993. 125 p. (In Russ.)
5. Gazhula SV. Specifics of trap magmatism in connection with the oil-and-gas content conditions of the Siberian platform. *Neftegazovaya geologiya. Teoriya i praktika = Petroleum Geology – Theoretical and Applied Studies*. 2008;3(1):1–8. (In Russ.)
6. Odintsova TV, Drobot DI. Trap magmatism and oil-and-gas potential of the Vendian terrigenous complex: Prilensky petroleum district. *Geologiya nefti i gaza = Russian Oil and Gas Geology*. 1983;7:6–10. (In Russ.)
7. Khomenko AV. Influence of trap sills on the structures of the Tunguskoye syneclyse sedimentary cover. In: Votakh OA, Solov'ev VA (eds.). *Trudy Instituta geologii i geofiziki. Vyp. 728. Tektonika platformennykh oblastei = Proceedings of the Institute of Geology and Geophysics Vol. 728. Tectonics of platform areas*. Novosibirsk: Nauka; 1988. p.66–10. (In Russ.)
8. Berzin AG, Rudykh IV, Berzin SA. Features of multilayered reservoirs formation of hydrocarbon fields of Nepsko-Botuoba anteclyse. *Geologiya nefti i gaza = Russian Oil and Gas Geology*. 2006;5:14–21. (In Russ.)
9. Vakhromeev AG, Ivanishin VM, Siraev RU, Raziapov RK, Sverkunov SA. Circulation loss in drilling of Riphean reservoirs at the south Tambei oil-gas-condensate field: applied and theoretical aspects. 3rd EAGE International GeoBaikal conference. Irkutsk; 2014. p.1–6.
10. Korobov AD, Korobova LA, Ahlestina EF. Mineralogical and paleogeothermal criteria for predicting oil and gas contents from the rift sedimentary basins. *Izvestiya Saratovskogo universiteta. Novaya seriya. Seriya: Nauki o Zemle = Izvestiya of Saratov University. New Series. Series: Earth Sciences*. 2009;9(2):28–35. (In Russ.)



11. Anuryev DA, Gladkov AV, Ignatev NA, Chuprov AA, Musin RA, Bayanov VA. Monitoring the development of the Verkhnechonskoye field. *Nauchno-tehnicheskii vestnik OAO "NK 'Rosneft'"*. 2016;2:56–59. (In Russ.)
12. Vakhromeev AG, Myshevskii NV, Khokhlov GA. Abnormally high reservoir pressure as a complicating factor in the development of hydrocarbon deposits in Eastern Siberia. *Sovremennaya geodinamika i opasnye prirodnye protsessy v Tsentral'noi Azii: fundamental'nyi i prikladnoi aspekty: materialy Vserossiiskogo soveshchaniya = Modern geodynamics and hazardous natural processes in Central Asia: fundamental and applied aspects: Proceedings of the All-Russian Meeting*. Vol. 5. Irkutsk: Institute of the Earth's Crust, SB RAS; 2006. p.98–119. (In Russ.)
13. Alexeeva L, Alexeev S, Vakhromeev A. Siberian Platform hydromineral resources: an updated analysis. In: *MinWat-14, Mineral waters: genesis, exploitation, protection and valorisation*. Karlovy Vary; 2014. p.14–15.
14. Auzina LI, Parshin AV. System-intergrated GIS-based approach to estimating hydrogeological conditions of oil-and gas fields in Eastern Siberia. *IOP Conference. Series: Earth and Environmental Science*. 2016;33:012060. <https://doi.org/10.1088/1755-1315/33/1/012060>
15. Shubin AV, Ryzhkov VI. Seismic study of sand-stone reservoir salinization. *Geofizika = Russian Geophysics*. 2013;5:17–25. (In Russ.)
16. Rapatskaya LA, Nikolaeva LV, Vasenyova EG. Features of lithofacies composition of osinsky brine-bearing producing horizon and the problem of drilling fluid disposal. *Vestnik Irkutskogo gosudarstvennogo tekhnicheskogo universiteta = Proceedings of Irkutsk State Technical University*. 2015;3:103–108. (In Russ.)
17. Vakhromeev AG, Khokhlov GA. The prospects for the prognosis of brine show in the Verkholensky and Zhigalovsky gas-bearing areas of the Irkutsk region. In: *Osobennosti tekhnologii provodki i zakanchivaniya skvazhin v Vostochnoi Sibiri i Yakutii = Specifics of the technology of hole making and completing the wells in Eastern Siberia and Yakutia*. Novosibirsk: Siberian Research Institute of Geology, Geophysics and Mineral Resources; 1988. p.140–142. (In Russ.)
18. Rapatskaya LA, Nikolaeva LV, Vaseneva EG. Disposal of the drilling muds at the Kovykta gas condensate field in relation to environmental problems. In: *Novye idei v naukakh o Zemle: materialy VIII Mezhdunarodnoi konferentsii = New ideas in Earth Sciences: Proceedings of the 8th International conference*. Moscow; 2007. p.225–227. (In Russ.)
19. Rapatskaya LA, Tonikh ME, Ustyuzhanin AO. Natural reservoir as a geological body for storing helium reserves. *IOP Conference. Series: Earth and Environmental Science*. 2020;408:012060. <https://doi.org/10.1088/1755-1315/408/1/012060>
20. Wilson K, Shokarev I, Small J, Akhundov E. The results of the new drilling technologies application in the development of a complex field in Eastern Siberia: Verkhnechonsky oil and gas condensate field. *Neftegazovaya vertikal'*. 2011;2:54–55. (In Russ.)

Критерии авторства / Authorship criteria

Рапацкая Л.А. написала статью, имеет на нее авторские права и несет ответственность за plagiat.

Larisa A. Rapatskaya is the author of the article, holds the copyright and bears responsibility for plagiarism.

Конфликт интересов / Responsibility for plagiarism

Автор заявляет об отсутствии конфликта интересов.

The author declares that there is no conflict of interest regarding the publication of this article.

Автор прочитал и одобрил окончательный вариант рукописи.

The author has read and approved the final version of this manuscript.

Сведения об авторе / Information about the author



Рапацкая Лариса Александровна,
кандидат геолого-минералогических наук, доцент,

профессор кафедры геологии, геофизики и геоинформационных систем,
Институт недропользования,
Иркутский национальный исследовательский технический университет,

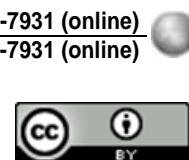
664074, г. Иркутск, ул. Лермонтова, 83, Россия,

✉ e-mail: raplarisa@yandex.ru

Larisa A. Rapatskaya,

Cand. Sci. (Geol. & Mineral.), Docent,
Professor, Department of Geology, Geophysics and Geoinformation Systems,
Institute of Subsoil Use,
Irkutsk National Research Technical University,
83 Lermontov St., Irkutsk 664074, Russia,

✉ e-mail: raplarisa@yandex.ru



Оригинальная статья / Original article

УДК 550.8.055:550.8.014

DOI: <http://dx.doi.org/10.21285/2686-9993-2020-43-3-364-374>

Фильтрационно-емкостные свойства бурового шлама по данным ядерно-магнитной резонансной релаксометрии и диэлектрической спектроскопии

© А.А. Мезин^a, М.Й. Шумскайт^b, В.Н. Глинских^c, Н.А. Голиков^d, Е.С. Чернова^e^{a-d}Институт нефтегазовой геологии и геофизики им. А.А. Трофимука СО РАН, г. Новосибирск, Россия^eНовосибирский национальный исследовательский государственный университет, г. Новосибирск, Россия

Резюме: Цель описанного исследования заключалась в расширении возможностей применения методов ядерно-магнитной резонансной релаксометрии и диэлектрической спектрометрии на примере совместной интерпретации данных этих методов для оперативного получения дополнительной петрофизической информации о свойствах и структуре порового пространства бурового шлама. Актуальность работы обусловлена тем, что данные, полученные на буровом шламе при помощи комплекса этих методов, могут использоваться в качестве опорной (начальной) информации при интерпретации данных геофизических исследований скважин до проведения детальных петрофизических исследований керна или при его отсутствии в интервале отбора. Объектом исследования служили образцы бурового шлама с месторождений Западно-Сибирской нефтегазоносной провинции на предмет определения их фильтрационно-емкостных свойств при насыщении разными флюидами методами импульсной ядерно-магнитной резонансной релаксометрии и диэлектрической спектрометрии. В рамках экспериментальных исследований выполнены ядерно-магнитные резонансные измерения образцов керна разной степени дискретизации для определения их фильтрационно-емкостных свойств в зависимости от степени измельчения. Показано, что результаты не зависят от размерности частиц измеряемого образца и согласуются с результатами стандартных петрофизических исследований. Установлены зависимости пористости от типа насыщающего флюида. На основе данных метода диэлектрической спектроскопии определено значение комплексной диэлектрической проницаемости образцов, которое показывает, как изменяется степень насыщения в зависимости от флюида и что происходит в поровом пространстве. Совместная интерпретации результатов данных этих двух методов позволяет получить дополнительную информацию о фильтрационно-емкостных свойствах бурового шлама и использовать ее в качестве априорной информации о свойствах пласта-коллектора.

Ключевые слова: буровой шлам, комплексная диэлектрическая проницаемость, релаксационные характеристики, фильтрационно-емкостные свойства, ядерно-магнитный резонанс

Информация о статье: поступила в редакцию 06 июля 2020 г.; поступила после рецензирования и доработки 03 августа 2020 г.; принята к публикации 01 сентября 2020 г.

Для цитирования: Мезин А.А., Шумскайт М.Й., Глинских В.Н., Голиков Н.А., Чернова Е.С. Фильтрационно-емкостные свойства бурового шлама по данным ядерно-магнитной резонансной релаксометрии и диэлектрической спектроскопии. *Науки о Земле и недропользование*. 2020. Т. 43. № 3. С. 364–374. <https://doi.org/10.21285/2686-9993-2020-43-3-364-374>

Reservoir properties of drill cutting by the nuclear magnetic resonance relaxometry and dielectric spectroscopy data

© Andrey A. Mezin^a, Mariya Y. Shumskayte^b, Vyacheslav N. Glinskikh^c,
Nikita A. Golikov^d, Elena S. Chernova^e^{a-d}Trofimuk Institute of Petroleum Geology and Geophysics,
Siberian Branch of the Russian Academy of Sciences, Novosibirsk, Russia
^eNovosibirsk National Research State University, Novosibirsk, Russia

Abstract: The purpose of the study is to extend the use of nuclear magnetic resonance relaxometry and dielectric spectrometry methods. This is realized through a complex interpretation of the data by the above methods to timely provide additional petrophysical information about the drill cuttings pore space properties and structure. The relevance of the study is that the data on the drill cuttings obtained by the NMR method can be used as prior information in the logging data



interpretation before a detailed petrophysical study of the core sample or in case of the core absence in the sampling interval. The objects of study are the drill cuttings samples from the fields of the West Siberian oil-and-gas province. The samples are saturated with different fluids, and their reservoir properties are determined by the nuclear magnetic resonance and dielectric spectrometry methods. As part of the experimental research, nuclear magnetic resonance investigations of the core samples of different discretization degrees have been carried out to determine the reservoir properties of the samples depending on the degree of their particle size reduction. It has been shown that the obtained results do not depend on the particle size of the measured sample and are consistent with the results of the standard petrophysical studies. The relationship between the porosity and the saturating fluid type has been established. Based on the data obtained by the dielectric spectroscopy method, the study has determined the value of the complex dielectric constant that shows how the degree of saturation changes depending on the fluid, and what happens in the pore space. The complex interpretation of the results obtained by the two methods provides additional information on the drill cuttings reservoir properties that can be used as a priori information on the formation properties.

Keywords: drill cuttings, complex dielectric constant, relaxation characteristics, reservoir properties, nuclear magnetic resonance

Information about the article: received July 06, 2020; revised August 03, 2020; accepted September 01, 2020.

For citation: Mezin AA, Shumskayte MY, Glinskikh VN, Golikov NA, Chernovae ES. Reservoir properties of drill cutting by the nuclear magnetic resonance relaxometry and dielectric spectroscopy data. *Nauki o Zemle i nedropol'zovanie = Earth sciences and subsoil use*. 2020;43(3):364–374. (In Russ.) <https://doi.org/10.21285/2686-9993-2020-43-3-364-374>

Введение

Ядерный магнитный резонанс (ЯМР) – мощный физический эффект, широко использующийся в различных областях научных исследований для изучения свойств, структуры и состояния вещества. Метод ЯМР на сегодняшний день успешно применяется в крупнейших нефтегазовых компаниях и ведущих научных лабораториях мира для изучения фильтрационно-емкостных и физико-химических свойств горных пород и насыщающих их флюидов. Популярным становится комплексирование метода ЯМР с методами, отличающимися разной чувствительностью к определенным характеристикам породы и пластового флюида, что позволяет получить дополнительную информацию об изучаемом образце при совместной интерпретации результатов. К таким методам можно отнести диэлектрическую спектроскопию. При изучении флюидонасыщенной горной породы значительную роль в формировании диэлектрической проницаемости (ДП) играют поляризационные процессы, происходящие на границе породы и флюида. Релаксационные процессы, действующие на этих поверхностях, в значительной мере определяют и ядерно-магнитные свойства изучаемых пород.

При разработке нефтяных и газовых месторождений самой важной информацией о пласте-коллекторе являются данные о его фильтрационно-емкостных свойствах (ФЕС), детальный анализ которых проводится

в лабораторных условиях на образцах керна. Достоверность и представительность полученной петрофизической информации зависит от качества отобранного кернового материала. На интервалах пласта-коллектора без отбора керна необходимую информацию о ФЕС могут дать исследования, проведенные на буровом шламе. Одним из методов оперативного изучения ФЕС бурового шлама является ядерно-магнитная резонансная релаксометрия (ЯМР-релаксометрия), которая хорошо зарекомендовала себя при изучении петрофизических параметров образцов пород-коллекторов произвольной формы и размера [1–7].

Работы многих исследователей посвящены изучению возможности определения ФЕС бурового шлама, в том числе по данным метода ЯМР. Петрофизические ЯМР-исследования бурового шлама сложны по двум причинам. Во-первых, маленькие обломки породы дают очень слабый сигнал и, соответственно, низкое отношение сигнал / шум, во-вторых, процедура подготовки проб не позволяет достаточно быстро обрабатывать результаты и получать данные. С помощью ЯМР-исследований бурового шлама терригенных пород можно восполнить потерю петрофизической информации при интерпретации данных геофизических исследований скважин (ГИС), которая возникает вследствие того, что петрофизическая модель создается по интегрированным параметрам объекта по



всей площади залегания пласта и не учитывает неоднородность отложений [8–11].

Технология и возможности метода ЯМР позволяют использовать буровой шлам не только для оперативного решения геологических задач в процессе бурения, но и для восполнения потерь петрофизической информации для пластов, пробуренных без отбора керна. Эффективность использования метода ЯМР для исследования шлама определяется тем, что результаты измерений в этом случае практически не зависят от формы и размеров исследуемых образцов [12].

Широкое распространение методов ЯМР для измерений в открытом стволе скважины (ядерный магнитный каротаж) и для лабораторного исследования керна привело к использованию этого метода и для восстановления значений пористости коллекторов по шламу [1]. Результат сопоставления значения пористости, определенного с помощью метода ЯМР-релаксометрии на образцах бурового шлама, со значением пористости, полученным традиционными методами на керне, доказывает возможность использования ЯМР-пористости шлама для восстановления ФЕС породы. Достоинство метода ЯМР состоит в том, что, помимо определения общей пористости, интерпретация распределения времен поперечной релаксации полностью водонасыщенных обломков дает возможность оценить эффективную пористость и распределение пор по размерам. В процессе бурения поисковых и разведочных скважин, где чаще всего отсутствует петрофизическая база, данные, полученные непосредственно на скважине методом ЯМР-релаксометрии, можно использовать для оперативного петрофизического обеспечения интерпретации данных ГИС. Тем не менее даже в некоторых крупных компаниях, занимающихся геологотехнологическими исследованиями, этот метод в качестве стандартного пока не применяется.

Особенности диэлектрических свойств нефтенасыщенного шлама обусловлены наличием адсорбционных пленок на границе раздела фаз, образованных, как правило, из высокомолекулярных полярных соединений углеводородов – смол и асфальтенов.

Адсорбционные пленки на поверхности гранул горных пород и капель воды увеличивают диэлектрические свойства всей системы [13]. Некоторые авторы изучали процессы образования и влияния на диэлектрические параметры системы разрушения адсорбционной пленки нефти на границах раздела «вода – нефть» [14]. При этом значение реальной части комплексной ДП растет во время образования адсорбционной пленки и не увеличивается с ростом толщины пленки [15].

В работах [16, 17] описано проведение математического моделирования образцов горных пород кварца и кальцита. Были построены модели зависимости ДП образца от пористости и насыщения водой. Результаты моделирования показали, что при насыщении образцов выше 20 % для кварца и 30 % для кальцита значение ДП линейно растет с увеличением пористости и количества воды. Однако при насыщении меньше 20 % для кварца значение ДП не зависит от изменений пористости и степени насыщения. А при концентрации меньше 30 % для кальцита значение ДП уменьшается при увеличении пористости и фиксированном значении доли воды.

Таким образом, целью работы является расширение возможностей применения методов ЯМР-релаксометрии и диэлектрической спектрометрии на примере совместной интерпретации данных этих методов для оперативного получения дополнительной петрофизической информации о свойствах и структуре порового пространства бурового шлама.

Объект и методы исследования

Объектом исследования настоящей работы служили образцы бурового шлама с месторождений Западно-Сибирской нефтегазоносной провинции на предмет определения их ФЕС методами импульсной ЯМР-релаксометрии и диэлектрической спектрометрии при насыщении разными флюидами.

Авторами выполнено экспериментальное изучение свойств 10 образцов бурового шлама с глубин 2480–3100 м. В табл. 1 приведено литологическое описание исследуемых образцов.



Таблица 1. Литологическое описание образцов шлама
Table 1. Lithological description of the drill cuttings samples

Номер образца	Глубина, м	Описание
1	2480	Песок средне- и мелкозернистый, обломки алевролита, небольшое количество глины в виде взвеси
2	2580	Песок средне- и мелкозернистый, обломки алевролита (30–40 %), глина тонет
3	2680	Обломки аргиллита глинистого непрочесные (растираются в пыль)
4	2714	Песок мелкозернистый, обломки алевролита, обломки аргиллита (10–15 %)
5	2800	Обломки алевролита, обломки аргиллита (40 %), глина в виде взвеси
6	2850	Обломки аргиллита, обломки алевролита (50 %), глина в виде взвеси
7	2900	Обломки аргиллита, обломки алевролита (40 %), глина в виде взвеси
8	2950	
9	3000	
10	3100	

Измерения диэлектрических и ЯМР-характеристик проводились на следующих образцах:

- неизмененный шлам, насыщенный пластовым флюидом и фильтратом бурового раствора;
- шлам после холодной экстракции хлороформом;
- шлам, насыщенный керосином.

Такая последовательность позволила изучить влияние на диэлектрические и ЯМР-характеристики насыщающего флюида и оценить открытую пористость путем взвешивания образцов после высушивания и после насыщения керосином.

ЯМР-измерения проводятся на ЯМР-релаксометре МСТ-05 с рабочей частотой 2,2 МГц и индукцией магнитного поля 55 мТл.

Сначала измерения проводились на неизмененных образцах. Пробы помещались в емкость объемом 20 см³, взвешивались, затем выполнялись диэлектрические и ЯМР-измерения. Аналогичные измерения были повторены после холодной экстракции хлороформом, высушивания шлама в печи в течение 8 ч при температуре 105 °С и после насыщения образцов керосином.

На этапе определения значений комплексной ДП исследуемый образец помещался в экспериментальную ячейку в виде плоского конденсатора с диаметром электродов 28 мм и расстоянием между электродами 10 мм. Ячейка подключалась проводами к измеряющему прибору (измерителю комплексного импеданса LCR-78105G производства компании GW Insteck с диапазоном рабочих частот 0,02–5000 кГц). После получения значений компонент импеданса были рассчитаны значения

емкости пустой ячейки, а после и ячейки с образцом. По полученным данным было определено значение ДП на соответствующей частоте [18, 19].

Результаты экспериментальных исследований и их обсуждение

Физическое моделирование. Для подтверждения правомочности использования данных ЯМР, полученных на шламе, в качестве начальной петрофизической информации о пласте-коллекторе были приняты исследования образцов керна, выполненные на разных стадиях дискретизации. Сначала образец керна насыщался минерализованной водой (6 г/л) под вакуумом в течение 48 ч, выполнялось ЯМР-измерение. Затем образец аккуратно раскалывался пополам, помещался в емкость с водой на час, лишняя влага с поверхности удалялась с помощью фильтровальной бумаги и снова проводилось ЯМР-измерение. Далее каждая часть снова раскалывалась пополам. После разрушения образцов обломки просеивались через сито размером 1 мм для избавления от пыли, затем – через сито размером 2 мм для получения фракции 1–2 мм. Более крупные обломки добавлялись к отсеянной фракции. Все ЯМР-эксперименты проводились при одинаковых параметрах, чтобы учесть вклад от пор одного размера.

На каждом этапе регистрировалась релаксационная кривая, которая после математической обработки переводилась в распределение по временам поперечной релаксации T_2 (рис. 1), соответствующее распределению пор по размерам полностью флюидонасыщенной породы.

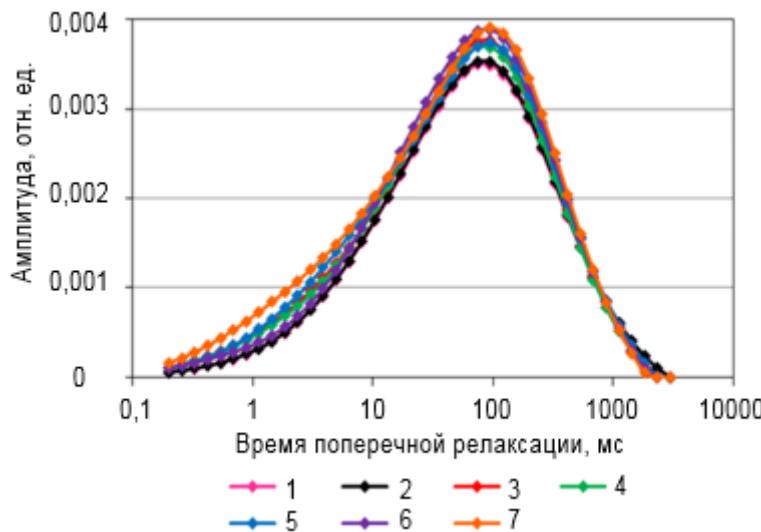


Рис. 1. Спектры по временам T_2 насыщенного образца керна в зависимости от степени дискретизации

Дискретное состояние образца: 1 – 1; 2 – 1/2; 3 – 1/4; 4 – 1/8; 5 – 1/16; 6 – 1/32; 7 – 1/64

Fig. 1. T_2 spectra of saturated core sample as a function of discretization degree

Discrete state of the sample: 1 – 1; 2 – 1/2; 3 – 1/4; 4 – 1/8; 5 – 1/16; 6 – 1/32; 7 – 1/64

На рисунке видно, что с изменением размерности спектры по временам T_2 меняются незначительно. Амплитуда спектров изменяется на 1–5 % с увеличением степени дискретизации, при этом разница амплитуд спектров исходного образца керна и его дискретного состояния 1/64 составляет 11 %. Вероятно, это связано с увеличением удельной поверхности образца, которая удерживает большее количество связанной воды. Изменение амплитуды также может быть связано с тем, что на поверхности мелких частиц остается пленка воды, которая не убирается фильтровальной бумагой.

По этим же причинам наблюдаются и некоторые отличия в параметрах образцов на разной стадии дискретизации – пористость и среднее логарифмическое времени поперечной релаксации T_2^{LM} незначительно увеличиваются. Доля капиллярно-связанного флюида меняется незначительно, тогда как доля свободного флюида становится меньше, а глинисто-связанного – больше.

Этот физический эксперимент показывает, что метод ЯМР-релаксометрии может успешно применяться при изучении ФЕС бурового шлама и позволяет использовать полученную информацию в качестве начальных данных о свойствах пласта-коллектора.

Экспериментальные ядерно-магнитные резонансные и диэлектрические исследования образцов шлама. Как уже говорилось выше, объектом исследования стали 10 образцов бурого шлама с разных глубин (см. табл. 1), на которых поочередно проводились ЯМР и диэлектрические исследования. Основные ЯМР-характеристики (ЯМР-пористость и T_2^{LM}) исходного шлама, насыщенного смесью пластового флюида и бурового раствора, представлены в табл. 2. Из таблицы видно, что коэффициент пористости меняется от 14 до 23 % со средним значением 17,3 %. Среднее время поперечной релаксации меняется от 8 до 20 мс со средним значением 12,8 мс.

На рис. 2 представлены спектры по временам T_2 исходного шлама. Видно, что спектры отличаются как по ширине, так и по амплитуде, что говорит о разной доле флюида в образцах и разной степени насыщения. Используя стандартные времена отсечки [20] для разделения глинисто- и капиллярно-связанного флюида (3 мс), а также капиллярно-связанного и свободного флюидов (33 мс), можно сделать вывод, что в исследуемых образцах шлама большая часть флюида находится в капиллярно-связанном состоянии. С увеличением глубины увеличивается доля глинисто-связанного флюида и уменьшается доля свободного флюида, спектры смещаются в область коротких времен релаксации.



Таблица 2. Исходные параметры бурового шлама
Table 2. Initial parameters of drill cuttings

Номер образца	h , м	m , г	K_n , %	T_2^{LM} , мс	FFI, %	BVI, %	CBW, %
1	2480	47,5917	22,18	15,2	29,2	59,7	11,1
2	2580	47,1232	22,62	19,9	39,1	52,5	8,4
3	2680	38,9229	18,29	17	32,5	58,1	9,4
4	2714	43,5759	15,4	10,8	19,3	63,8	16,9
5	2800	38,8566	13,98	16,3	31,3	58,7	10
6	2850	41,6932	15,1	11,2	22,7	60,5	16,9
7	2900	45,3793	18,12	10,9	18	66,4	15,6
8	2950	42,2841	15,59	8,9	13,2	66,9	19,9
9	3000	46,2395	18,6	10,6	18,8	65,4	15,9
10	3100	43,6207	17,92	9,6	14,8	65,9	19,3

Примечание: h – глубина; m – масса; K_n – ЯМР-пористость; T_2^{LM} – среднее логарифмическое время поперечной релаксации; FFI – доля свободного флюида; BVI – доля капиллярно-связанного флюида; CBW – доля глинисто-связанного флюида.

Note: h – depth; m – mass; K_n – NMR porosity; T_2^{LM} – average logarithmic time of transverse relaxation; FFI – free fluid fraction; BVI – capillary-associated fluid fractions; CBW – clay-associated fluid fraction.

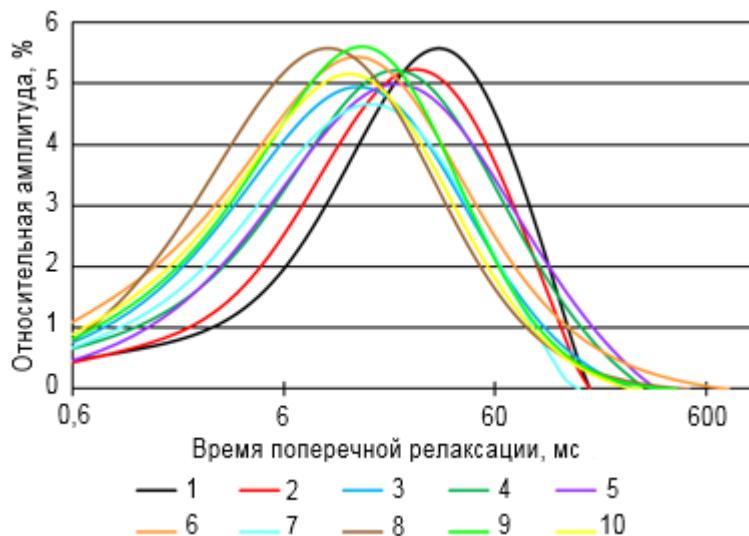


Рис. 2. Спектры по временам поперечной релаксации бурового шлама до экстракции

Глубина: 1 – 2480 м; 2 – 2580 м; 3 – 2680 м; 4 – 2714 м; 5 – 2800 м;
6 – 2850 м; 7 – 2900 м; 8 – 2950 м; 9 – 3000 м; 10 – 3100 м

Fig. 2. Transverse relaxation time spectra of drill cuttings before extraction

Depth: 1 – 2,480 m; 2 – 2,580 m; 3 – 2,680 m; 4 – 2,714 m; 5 – 2,800 m;
6 – 2,850 m; 7 – 2,900 m; 8 – 2,950 m; 9 – 3,000 m; 10 – 3,100 m

Холодная экстракция бурового шлама хлороформом показала, что пелитовая фракция легко вымывается из шлама. Песчанистые образцы «отмываются» после 1–2 промывок до состояния «чистых» песчинок с запахом нефти. Алевритовые образцы «отмываются» только после 3–4 промывок, при этом частицы крупные, темного цвета с резким запахом нефти. Спектры по временам поперечной релаксации показывают изменение коэффициента пористости и перераспределение пустот-

ного пространства бурового шлама на каждом этапе экстракции (табл. 3, рис. 3).

На графиках видно, что спектр исходного образца характеризуется наибольшей амплитудой, то есть в образце содержится наибольшее количество флюида, который занимает не только поры, но и каналы, их соединяющие. Холодная экстракция хлороформом с последующей сушкой образца сопровождается уменьшением амплитуды, ЯМР-пористости и увеличением диапазона времен T_2 . Спектр



Таблица 3. Значения коэффициента пористости бурового шлама

на разных этапах экстракции и насыщения, %

Table 3. Drill cuttings porosity ratio at different stages of extraction and saturation, %

Вид образца	Номер образца									
	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
Исходный	22,18	22,62	18,29	15,4	13,98	15,1	18,12	15,59	18,6	17,92
Промытый	1,23	2,57	1,99	1,18	0,88	0,49	0,87	2,34	0,85	1,1
Насыщенный	21,7	24,74	12,62	18,03	17,11	23,81	15,48	16,16	21,02	25,66

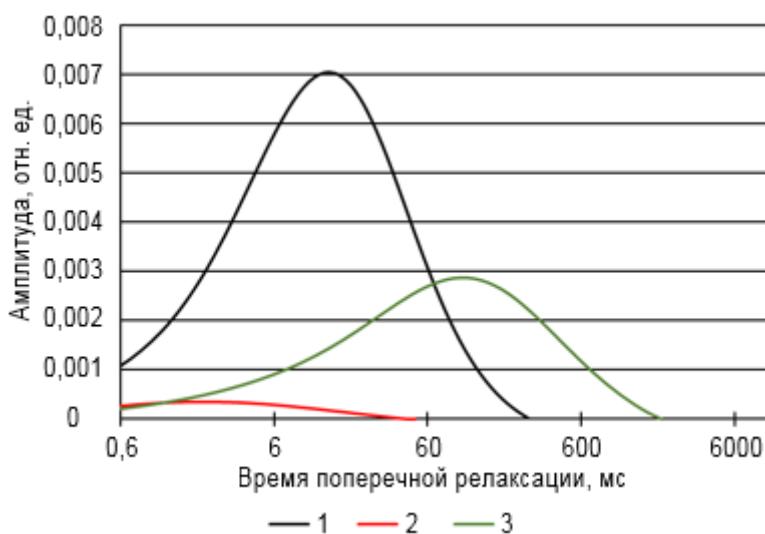


Рис. 3. Спектры по временам поперечной релаксации бурового шлама на разных этапах экстракции и насыщения

Вид образца: 1 – № 3 исходный; 2 – № 3 промытый; 3 – № 3 насыщенный

Fig. 3. Transverse relaxation time spectra of drill cuttings at different stages of extraction and saturation

Sample type: 1 – № 3 initial; 2 – № 3 washed; 3 – № 3 saturated

сухого шлама имеет незначительную амплитуду и очень короткие времена поперечной релаксации, характеризующие остаточный глинисто-связанный флюид. Последующее насыщение бурового шлама керосином приводит к изменению времен релаксации иестественному увеличению амплитуды и ЯМР-пористости, поскольку заполняется все освободившееся после промывки хлороформом пустотное пространство. Оцененные значения пористости неизмененного шлама и шлама, насыщенного керосином, согласуются. В керосинонасыщенных образцах бурового шлама большая часть флюида находится в свободном состоянии, глинисто-связанного флюида незначительное количество. Вышеописанные на примере образца № 3 закономерности аналогичны для всех образцов коллекции.

По результатам диэлектрических измерений имеем зависимости, отображенные на рис. 4. По графикам видно, что значения ДП после насыщения керосином превышают значение ДП шлама в начальном состоянии, самые низкие значения – у промытого шлама. После холодной экстракции хлороформом часть смеси пластового флюида и бурового раствора вымывается из порового пространства за исключением очень мелких и закрытых пор – в результате наблюдаем ненулевой сигнал от промытого образца. ДП у насыщенного керосином образца примерно в два раза выше, чем у нефтенасыщенного. Вероятно, это связано с разной степенью насыщения шлама на разных этапах насыщения. После промывки освобождается большая часть пустотного пространства, которую затем и заполняет керосин, что приводит к увеличению значений ДП.

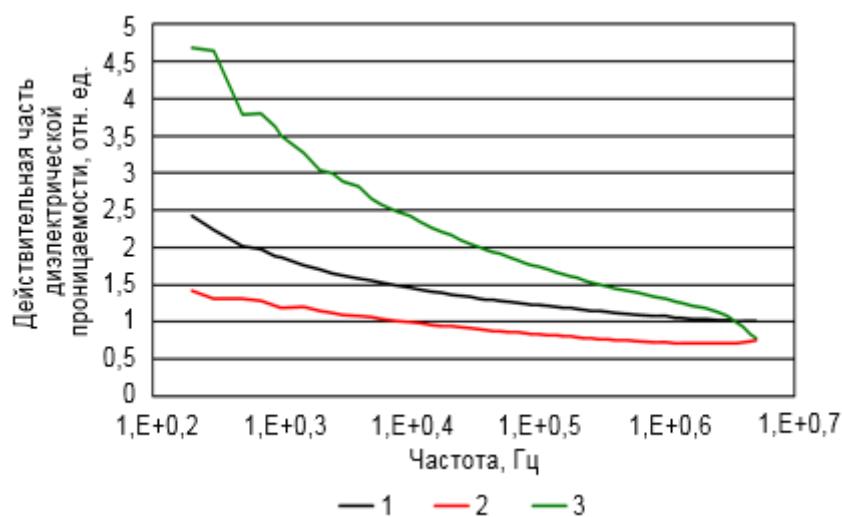


Рис. 4. Зависимость действительной части диэлектрической проницаемости бурового шлама от частоты на разных этапах экстракции и насыщения

Вид образца: 1 – исходный; 2 – промытый; 3 – насыщенный

Fig. 4. Real part of the drill cuttings dielectric constant as a function of the frequency

at different stages of extraction and saturation

Sample type: 1 – initial; 2 – washed; 3 – saturated

По данным методов ЯМР-релаксометрии и диэлектрической спектроскопии видно распределение флюида в поровом пространстве образца шлама как на этапе холодной экстракции хлороформом, так и при насыщении керосином. После экстракции флюид вымывается с поверхности зерен породы и из порового пространства, что приводит к уменьшению амплитуды ЯМР-сигнала и значения ДП, а также смещению в область малых времен поперечной релаксации. Соответственно, при насыщении освободившееся поровое пространство заполняется керосином, что приводит к росту амплитуды ЯМР-сигнала и значения ДП. Дополнительное смещение спектра ЯМР-сигнала в область больших времен релаксации характеризует увеличение количества флюида в поровом пространстве. Таким образом, методы ЯМР-релаксометрии и диэлектрической спектрометрии согласуются, что доказывает возможность совместного применения этих двух методов при изучении ФЕС пород-коллекторов на примере бурового шлама.

Заключение

В результате проведенных ЯМР-исследований образцов керна разной степени дискретизации авторами определены их ФЕС. Обнаружено, что ФЕС не зависят от степени измельчения образца и надежно определяются методом ЯМР-релаксометрии. Это позволяет создать основу петрофизической интерпретации данных ГИС на участках без выноса кернового материала. По результатам ЯМР и диэлектрических измерений бурового шлама с месторождений Западно-Сибирской нефтегазоносной провинции определены его основные петрофизические характеристики, такие как коэффициент пористости, степень связанности флюида, доля свободного флюида, изменение структуры порового пространства на разных этапах экстракции и насыщения. Совместная интерпретации результатов двух рассмотренных методов позволяет получить дополнительную информацию о ФЕС бурового шлама и использовать ее в дальнейшем как априорную информацию о свойствах пласта-коллектора.

Библиографический список

1. Аксельрод С.М. Современные тенденции в геолого-технологических исследованиях, проводимых в процессе бурения скважин (по материалам зарубежной литературы) // Каротажник. 2015. № 6. С. 77–110.

2. Белорай Я.Л., Кононенко И.Я. Использование ядерно-магнитных исследований для геоинформационного обеспечения строительства скважин // Каротажник. 2006. № 1. С. 53–65.



3. Мезин А.А., Шумскайте М.Й., Голиков Н.А., Бурухина А.И. Связь комплексной диэлектрической проницаемости нефти с ее физико-химическими свойствами и ЯМР-характеристиками // Геофизические технологии. 2019. № 4. С. 24–34. <https://doi.org/10.18303/2619-1563-2019-4-24>
4. Shumskayte M.Y., Glinskikh V.N. Relation of NMR parameters with specific surface and resistivity of shaly sandstone and siltstone samples: experimental study // Russian Geology and Geophysics. 2016. Vol. 57. Iss 10. P. 1509–1544. <https://doi.org/10.1016/j.rgg.2016.01.019>
5. Шумскайте М.Й., Глинских В.Н., Бортникова С.Б., Харитонов А.Н., Пермяков В.С. Лабораторное изучение жидкостей, выносимых из скважины, методом ЯМР-релаксометрии // Известия Томского политехнического университета. Инженеринг георесурсов. 2017. Т. 328. № 2. С. 59–66.
6. Howard J.J. Quantitative estimates of porous media wettability from proton NMR measurements // Magnetic Resonance Imaging. 1998. Vol. 16. Iss. 5-6. P. 529–533. [https://doi.org/10.1016/S0730-725X\(98\)00060-5](https://doi.org/10.1016/S0730-725X(98)00060-5)
7. Toumelin E., Torres-Verdin C., Bona N. Improving petrophysical interpretation with wide-band electromagnetic measurements // SPE Journal. 2008. Vol. 13. Iss. 2. P. 205–215. <https://doi.org/10.2118/96258-PA>
8. Mirochnik K., Kryuchkov S., Strack K. A novel method to determine NMR petrophysical parameters from drill cuttings // SPWLA 45th annual logging symposium: proc. of the conf. Noordwijk, 2004. 15 p.
9. Королев Н.Ю., Харисов Р.Ф., Степаненков Л.Е. Определение фильтрационно-емкостных свойств выбуренной породы (шлама) с помощью ядерно-магнитного релаксометра MST // Каротажник. 2009. № 9. С. 332–340.
10. Мухидинов Ш.В., Ибрагимова С.В. Геофизические исследования в процессе бурения скважин для обеспечения геологической интерпретации данных ГИС // Каротажник. 2010. № 7. С. 95–102.
11. Керимов А-Г. Г. Методы оценки коэффициента пористости глинистых коллекторов в отложениях палеогена на площадях восточного Ставрополья // Вестник Северо-Кавказского государственного технического университета. 2007. № 4. С. 5–9.
12. Вавилин В.А., Галиев Т.Р., Кунакасов А.А., Романов Ю.К., Сорокина Е.В. Опыт ЯМР-исследований структуры порового пространства пород из месторождений с трудноизвлекаемыми запасами // Петрофизика сложных коллекторов: проблемы и перспективы 2015: сб. статей. М.: EAGE, 2015. С. 259–274.
13. Kovaleva L.A., Minnigalimov R.Z., Zinnatullin R.R. Investigation of dielectric and rheological characteristics of water-oil emulsions // High Temperature. 2008. Vol. 46. Iss. 5. P. 728–730. <https://doi.org/10.1134/S0018151X08050210>
14. Zinnatullin R.R., Fatkhullina Yu.I., Kamaltdinov I.M. Investigation of formation of an adsorption film by high-frequency dielectric spectrometry // High Temperature. 2012. Vol. 50. Iss. 2. P. 298–299. <https://doi.org/10.1134/S0018151X1202023X>
15. Cosenza P., Ghorbani A., Revil A., Zamora M., Schmutz M., Jougnot D., et al. A physical model of the low-frequency electrical polarization of clay rocks // Journal of Geophysical Research: Solid Earth. 2008. Vol. 113. Iss. B8. P. 1–9. <https://doi.org/10.1029/2007JB005539>
16. Lesmes D.P., Morgan F.D. Dielectric spectroscopy of sedimentary rocks // Journal of Geophysical Research: Solid Earth. 2001. Vol. 106. Iss. B7. P. 13329–13346. <https://doi.org/10.1029/2000JB900402>
17. Martinez A., Byrnes A.P. Modeling dielectric-constant values of geologic materials: an aid to ground-penetrating radar data collection and interpretation // Current Research in Earth Sciences. 2001. Vol. 247. Iss. 1. P. 1–16.
18. Аксельрод С.М. Новые тенденции в диэлектрическом каротаже (по материалам зарубежной печати) // Каротажник. 2012. № 4. С. 78–112.
19. Lapina A.S., Bobrov P.P., Golikov N.A., Repin A.V., Shumskayte M.Y. Hysteresis of the NMR response and the complex relative permittivity of the quartz granules powders and solid sandstones during the water imbibition and drainage // Measurement Science and Technology. 2017. Vol. 28. Iss. 1. P. 014007. <https://doi.org/10.1088/1361-6501/28/1/014007>
20. Coates J., Xiao L., Prammer M. NMR logging. Principles and applications. Houston: Gulf Publishing Company, 1999. 342 p.

References

1. Akselrod SM. Up-to-date trends in geologic and engineering surveys (mud logging) while drilling (based on foreign publications). *Karotazhnik*. 2015;6:77–110. (In Russ.)
2. Beloray YaL, Kononenko IYa. Use of nuclear-magnetic researches for geoinformation support of well construction. *Karotazhnik*. 2006;1:53–65. (In Russ.)
3. Mezin AA, Shumskayte MY, Golikov NA, Burukhina AI. Relation of integrated dielectric permeability of oil with its physical and chemical properties and NMR characteristics. *Geofizicheskie tekhnologii = Russian Journal of geophysical technologies*. 2019;4:24–34. (In Russ.) <https://doi.org/10.18303/2619-1563-2019-4-24>
4. Shumskayte MY, Glinskikh VN. Relation of NMR parameters with specific surface and resistivity of shaly sandstone and siltstone samples: experimental study. *Russian Geology and Geophysics*. 2016;57(10):1509–1544. <https://doi.org/10.1016/j.rgg.2016.01.019>
5. Shumskayte MY, Glinskikh VN, Bortnikova SB, Kharitonov AN, Permyakov VS. NMR-relaxometry laboratory study of fluids carried out of boreholes. *Izvestiya Tomskogo politekhnicheskogo universiteta. Inzhiniring georesursov = Bulletin of the Tomsk Polytechnic University. Geo Assets Engineering*. 2017;328(2):59–66. (In Russ.)
6. Howard JJ. Quantitative estimates of porous media wettability from proton NMR measurements. *Magnetic Resonance Imaging*. 1998;16(5-6):529–533. [https://doi.org/10.1016/S0730-725X\(98\)00060-5](https://doi.org/10.1016/S0730-725X(98)00060-5)
7. Toumelin E., Torres-Verdin C., Bona N. Improving petrophysical interpretation with wide-band electromagnetic measurements. *SPE Journal*. 2008;13(2):205–215. <https://doi.org/10.2118/96258-PA>



8. Mirochnik K, Kryuchkov S, Strack K. A novel method to determine NMR petrophysical parameters from drill cuttings. In: *SPWLA 45th annual logging symposium: proc. of the conf.* Noordwijk; 2004. 15 p.
9. Korolev NYu, Kharisov RF, Stepanenkov LE. Evaluation of drilled-out rock filtration and capacity properties by a nuclear magnetic relaxation meter MST. *Karotazhnik*. 2009;9:332–340. (In Russ.)
10. Mukhidinov ShV, Ibragimova SV. Petrophysical investigations while drilling boreholes for the purpose of providing geologic interpretation of well logs. *Karotazhnik*. 2010;7:95–102. (In Russ.)
11. Kerimov AGG. Methods for assessing the porosity ratio of clay reservoirs in Paleogene sediments in the eastern Stavropol areas. *Vestnik Severo-Kavkazskogo gosudarstvennogo tekhnicheskogo universiteta = Newsletter of North-Caucasus Federal University*. 2007;4:5–9. (In Russ.)
12. Vavilin VA, Galiev TR, Kunakasov AA, Romanov YuK, Sorokina EV. NMR study of the pore space structure for the rocks of the fields with hard-to-extract reserves. In: *Petrofizika slozhnykh kollektorov: problemy i perspektivy 2015 = Petrophysics of complicated reservoirs: problems and prospects 2015*. Moscow: EAGE; 2015. p.259–274. (In Russ.)
13. Kovaleva LA, Minnigalimov RZ, Zinnatullin RR. Investigation of dielectric and rheological characteristics of water-oil emulsions. *High Temperature*. 2008;46(5):728–730. <https://doi.org/10.1134/S0018151X08050210>
14. Zinnatullin RR, Fatkullina Yul, Kamaldinov IM. Investigation of formation of an adsorption film by high-frequency dielectric spectrometry. *High Temperature*. 2012;50(2):298–299. <https://doi.org/10.1134/S0018151X1202023X>
15. Cosenza P, Ghorbani A, Revil A, Zamora M, Schmutz M, Jougnot D, et al. A physical model of the low-frequency electrical polarization of clay rocks. *Journal of Geophysical Research: Solid Earth*. 2008;113(B8):1–9. <https://doi.org/10.1029/2007JB005539>
16. Lesmes DP, Morgan FD. Dielectric spectroscopy of sedimentary rocks. *Journal of Geophysical Research: Solid Earth*. 2001;106(B7):13329–13346. <https://doi.org/10.1029/2000JB900402>
17. Martinez A, Byrnes AP. Modeling dielectric-constant values of geologic materials: an aid to ground-penetrating radar data collection and interpretation. *Current Research in Earth Sciences*. 2001;247(1):1–16.
18. Akselrod SM. New trends in dielectric logging (based on foreign publications). *Karotazhnik*. 2012;4:78–112. (In Russ.)
19. Lapina AS, Bobrov PP, Golikov NA, Repin AV, Shumskayte MY. Hysteresis of the NMR response and the complex relative permittivity of the quartz granules powders and solid sandstones during the water imbibition and drainage. *Measurement Science and Technology*. 2017;28(1):014007. <https://doi.org/10.1088/1361-6501/28/1/014007>
20. Coates J, Xiao L, Prammer M. *NMR logging. Principles and applications*. Houston: Gulf Publishing Company; 1999. 342 p.

Критерии авторства / Authorship criteria

Мезин А.А., Шумскайте М.Й., Глинских В.Н., Голиков Н.А., Чернова Е.С. написали статью, имеют равные авторские права и несут одинаковую ответственность за плагиат.

Andrey A. Mezin, Mariya Y. Shumskayte, Vyacheslav N. Glinskikh, Nikita A. Golikov, Elena S. Chernova are the authors of the article, hold equal copyright and bear equal responsibility for plagiarism.

Конфликт интересов / Responsibility for plagiarism

Авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов.

The authors declare that there is no conflict of interest regarding the publication of this article.

Все авторы прочитали и одобрили окончательный вариант рукописи.

All authors have read and approved the final version of this manuscript.

Сведения об авторах / Information about the authors



Мезин Андрей Алексеевич,
младший научный сотрудник Лаборатории многомасштабной геофизики,
Институт нефтегазовой геологии и геофизики им. А.А. Трофимука СО РАН,
630090, г. Новосибирск, просп. Академика Коптюга, 3, Россия,
e-mail: mezinaa@ipgg.sbras.ru

Andrey A. Mezin,
Junior Researcher of Laboratory of Multiscale Geophysics,
Trofimuk Institute of Petroleum Geology and Geophysics,
Siberian Branch of the Russian Academy of Sciences,
3 Koptug Ave., Novosibirsk 630090, Russia,
e-mail: mezinaa@ipgg.sbras.ru



Шумскайте Мария Йоновна,
кандидат технических наук,
старший научный сотрудник Лаборатории многомасштабной геофизики,
Институт нефтегазовой геологии и геофизики им. А.А. Трофимука СО РАН,
630090, г. Новосибирск, просп. Академика Коптюга, 3, Россия,
✉ e-mail: shumskaitemi@ipgg.sbras.ru

Mariya Y. Shumskayte,
Cand. Sci. (Eng.),
Senior Researcher of Laboratory of Multiscale Geophysics,
Trofimuk Institute of Petroleum Geology and Geophysics,
Siberian Branch of the Russian Academy of Sciences,
3 Koptug Ave., Novosibirsk 630090, Russia,
✉ e-mail: shumskaitemi@ipgg.sbras.ru



Глинских Вячеслав Николаевич,
доктор физико-математических наук, член-корреспондент РАН,
заведующий Лабораторией многомасштабной геофизики,
Институт нефтегазовой геологии и геофизики им. А.А. Трофимука СО РАН,
630090, г. Новосибирск, просп. Академика Коптюга, 3, Россия,
e-mail: glinskikhvn@ipgg.sbras.ru

Vyacheslav N. Glinskikh,
Dr. Sci. (Phys. & Math.), Corresponding member of the Russian Academy of Sciences,
Head of Laboratory of Multiscale Geophysics,
Trofimuk Institute of Petroleum Geology and Geophysics,
Siberian Branch of the Russian Academy of Sciences,
3 Koptug Ave., Novosibirsk 630090, Russia,
e-mail: glinskikhvn @ipgg.sbras.ru



Голиков Никита Александрович,
кандидат технических наук,
старший научный сотрудник Лаборатории многомасштабной геофизики,
Институт нефтегазовой геологии и геофизики им. А.А. Трофимука СО РАН,
630090, г. Новосибирск, просп. Академика Коптюга, 3, Россия,
e-mail: golikovna@ipgg.sbras.ru

Nikita A. Golikov,
Cand. Sci. (Eng.),
Senior Researcher of Laboratory of Multiscale Geophysics,
Trofimuk Institute of Petroleum Geology and Geophysics,
Siberian Branch of the Russian Academy of Sciences,
3 Koptug Ave., Novosibirsk 630090, Russia,
e-mail: golikovna@ipgg.sbras.ru



Чернова Елена Сергеевна,
магистрант,
Новосибирский национальный исследовательский государственный университет,
630090, г. Новосибирск, ул. Пирогова, 1, Россия,
e-mail: ellenchernova@yandex.ru

Elena S. Chernova,
Master Degree Student,
Novosibirsk National Research State University,
1 Pirogov St., Novosibirsk 630090, Russia,
e-mail: ellenchernova@yandex.ru



Оригинальная статья / Original article

УДК 550.424.2

DOI: <http://dx.doi.org/10.21285/2686-9993-2020-43-3-375-417>

Epigenetic geochemical dynamics and driving mechanisms of chemical elemental distribution patterns in soil in Southwest China*

© Hangxin Cheng^a, Min Peng^b, Chuandong Zhao^c, Wei Han^d, Huiyan Wang^e, Qiaolin Wang^f, Fan Yang^g, Fugui Zhang^h, Chengwen Wangⁱ, Fei Liu^j, Yalong Zhou^k, Shiqi Tang^l, Kuo Li^m, Ke Yangⁿ, Zheng Yang^o, Xiaomeng Cheng^p, Ziwan Chen^q, Hua Zhang^r, Chunhu Mo^s

^{a–p}Institute of Geophysical & Geochemical Exploration,
Chinese Academy of Geological Sciences, Langfang, China

^bChina University of Geosciences (Beijing), Beijing, China

^qYunnan Institute of Geological Survey, Kunming, China

^rSichuan Geological Survey, Chengdu, China

^sGuizhou Geological Survey, Guiyang, China

Abstract: The Earth's surface is a complex system involving mutual interactions of its many components, including mountains, rivers, forests, farmlands, lakes and grasses. The interaction and mutual feedback of chemical elements in Earth's surface layer can drive changes in chemical elemental distribution patterns. In this study, we evaluated the mechanisms and interactions driving the distribution patterns of macroelements, probiotics, halogens and heavy metals in soils in Southwest China, based on a systematic geochemical land-quality survey at a scale of 1:250000. The results showed that the parent material determines the natural state of chemical elements in land resources. Epigenetic geochemical dynamics reshapes the distribution patterns of chemical elements in top soil; biogeochemical processes drive the evolutionary trends of land quality; and human activities, such as mining, disrupt the natural evolution of chemical elemental distribution patterns. The establishment of an epigenetic geochemical dynamics theory allows the construction of a framework for understanding the Earth's surface layer and promoting technological innovations for the comprehensive geochemical investigation of land resources.

Keywords: epigenetic geochemical dynamics, driving mechanisms, distribution pattern of elements in soils, Southwest China

Acknowledgments: During the project, more than 100 researchers and workers from the Yunnan Geological Survey, Sichuan Geological Survey and Guizhou Geological Survey participated in the field work. More than 20 researchers from the Central Laboratory of the Institute of Geophysical and Geochemical Exploration of the Chinese Academy of Geological Sciences participated in the sample analysis and testing processes. The authors would like to thank all participants for their contributions to this work.

Information about the article: Received July 08, 2020; revised August 10, 2020; accepted September 04, 2020.

For citation: Cheng Hangxin, Peng Min, Zhao Chuandong, Han Wei, Wang Huiyan, Wang Qiaolin, et al. Epigenetic geochemical dynamics and driving mechanisms of chemical elemental distribution patterns in soil in Southwest China. *Nauki o Zemle i nedropol'zovanie = Earth sciences and subsoil use.* 2020;43(3):375–417. (In Russ.) <https://doi.org/10.21285/2686-9993-2020-43-3-375-417>

*The article was provided by the Earth Science Frontiers journal within the framework of the agreement between the editorial boards of Irkutsk National Research Technical University (Irkutsk, Russia) and China University of Geosciences (Beijing, China) on the exchange of open access scientific papers.



Эпигенетическая геохимическая динамика и движущие механизмы закономерностей распределения химических элементов в почвах Юга-Западного Китая*

© Хансинь Чэн^a, Минь Пэн^b, Чуаньдун Чжао^c, Вэй Хань^d, Хуянь Ван^e,
Цяолинь Ван^f, Фань Ян^g, Фугуй Чжан^h, Чэнвэнь Ванⁱ, Фэй Лю^j,
Ялун Чжоу^k, Шици Тан^l, Ко Ли^m, Кэ Янⁿ, Чжэн Ян^o,
Сяомэн Чэн^p, Цзывань Чэн^q, Хуа Чжан^r, Чуньху Мо^s

^{a–p}Институт геофизических и геохимических исследований
Китайской академии геологических наук, г. Ланфан, Китай

^bКитайский геологический университет (Пекин), г. Пекин, Китай

^gЮньнаньский институт Геологической службы, г. Куньмин, Китай

^lСычуаньская геологическая служба, г. Чэнду, Китай

^sГеологическая служба Гуйчжоу, г. Гуйян, Китай

Резюме: Поверхность Земли представляет собой сложную систему, включающую взаимодействие многих ее компонентов, в том числе гор, рек, лесов, сельскохозяйственных угодий, озер и трав. Взаимодействие и взаимная обратная связь химических элементов в поверхностном слое Земли может привести к изменениям в структуре распределения химических элементов. В этом исследовании авторы оценили механизмы и взаимодействия, определяющие характер распределения макроэлементов, пробиотиков, галогенов и тяжелых металлов в почвах Юго-Западного Китая, на основе систематического геохимического исследования качества земли в масштабе 1:250000. Результаты показали, что исходный материал определяет естественное состояние химических элементов земельных ресурсов. Эпигенетическая геохимическая динамика меняет характер распределения химических элементов в верхнем слое почвы, биогеохимические процессы определяют эволюционные тенденции качества земли, а деятельность человека, такая как добыча полезных ископаемых, нарушает естественную эволюционную схему распределения химических элементов. Создание теории эпигенетической геохимической динамики позволяет построить основу для понимания поверхностного слоя Земли и продвигать инновационные технологии для всестороннего геохимического исследования ресурсов земной коры.

Ключевые слова: эпигенетическая геохимическая динамика, движущие механизмы, закономерности распределения элементов в почвах, Юго-Западный Китай

Благодарности: В процессе реализации проекта более ста исследователей и сотрудников из геологических служб провинций Юньнань, Сычуань и Гуйчжоу принимали участие в полевых работах. Более двадцати ученых из Центральной лаборатории Института геофизических и геохимических исследований Китайской академии геологических наук были привлечены к анализу и тестированию собранных образцов. Авторы хотели бы поблагодарить всех участников за их вклад в эту работу.

Информация о статье: Поступила в редакцию 08 июля 2020 г.; поступила после рецензирования и доработки 10 августа 2020 г.; принята к публикации 04 сентября 2020 г.

Для цитирования: Чэн Хансинь, Пэн Минь, Чжао Чуаньдун, Хань Вэй, Ван Хуянь, Ван Цяолинь [и др.]. Эпигенетическая геохимическая динамика и движущие механизмы закономерностей распределения химических элементов в почвах Юга-Западного Китая. *Науки о Земле и недропользование*. 2020. Т. 43. № 3. С. 375–417. <https://doi.org/10.21285/2686-9993-2020-43-3-375-417>

Background

Epigenetic geochemical dynamics explores the driving mechanisms, dynamic processes, and fractionation mechanisms of the distribution, allocation, migration and evolution of chemical elements and isotopes in surface rocks, water bodies, soils, organisms, atmosphere and other media or layers of the Earth. The Earth's surface is a complex system composed of various interact-

ing components, such as mountains, water bodies, forests, farmlands, lakes and grasslands. This system controls and regulates the natural habitat and maintains the resources required to sustain life on Earth [1]. The pedosphere is the key interface, at which the lithosphere, hydrosphere, biosphere and atmosphere interact. It plays an important role in the redistribution of elements, and is also an essential interface for

* Статья была представлена редакцией журнала *Earth Science Frontiers* в рамках соглашения между редакциями Иркутского национального исследовательского технического университета (г. Иркутск, Россия) и Китайского геологического университета (г. Пекин, Китай) об обмене научными статьями открытого доступа.



supporting economic and social developments [2]. Presently, the Earth is facing a serious environmental crisis in history. This has caused dysfunction in the Earth's surface layer and led to major changes in the global environment on which human survival depends. Understanding the behavior of chemical elements within the physical, chemical and biological processes of the Earth's surface, along with human-environmental interactions, has inevitably become a hot topic in exploratory geochemistry. Research in this area can reveal the driving mechanisms behind changes in the content and macroscopic distribution of elements in soil, thereby provide scientific solutions for the rational exploitation and utilization of natural resources.

In this study, we analyzed the mountainous regions near several cities including Zhaotong City in Yunnan Province, Bijie City in Guizhou Province, and Yibin and Luzhou Cities in Sichuan Province, and examined the driving mechanisms of chemical elemental distribution in soil.

Geographical and geological settings

The study area is located at the junction of Yunnan, Guizhou and Sichuan Provinces (102–

107° E and 25–30° N). The geographical environment of the area is complex, with different climate types co-existing at different elevations, and with significant regional variations. In the last 45 years, the average annual precipitation of the area was 1,885 mm, while temperature, precipitation and evaporation are increasing [3, 4].

The study area mainly consists of mountains and valleys, showing strong down-cutting and Karst landforms. The terrain slopes northwards, as behind elevation lowers gradually from the southwest to the northeast by a difference of greater than 3,400 m (Fig. 1). Farmlands, forests and grasslands accounted for 48.8 %, 41.4 % and 5.2 % of the total area of the region, respectively, and they represent the major land-use types in the region (Fig. 2).

All strata in the area have different degrees of exposure, where carbonate rocks, such as limestone and dolomite, from various periods, are widely distributed. Basalt, carbonate and sedimentary clastic rocks are the main parent materials of the regional soil (Fig. 3).

Lead (Pb), zinc (Zn) and silver (Ag) constitute the area's dominant mineral resources formed in the Devonian and Permian periods. The ores are

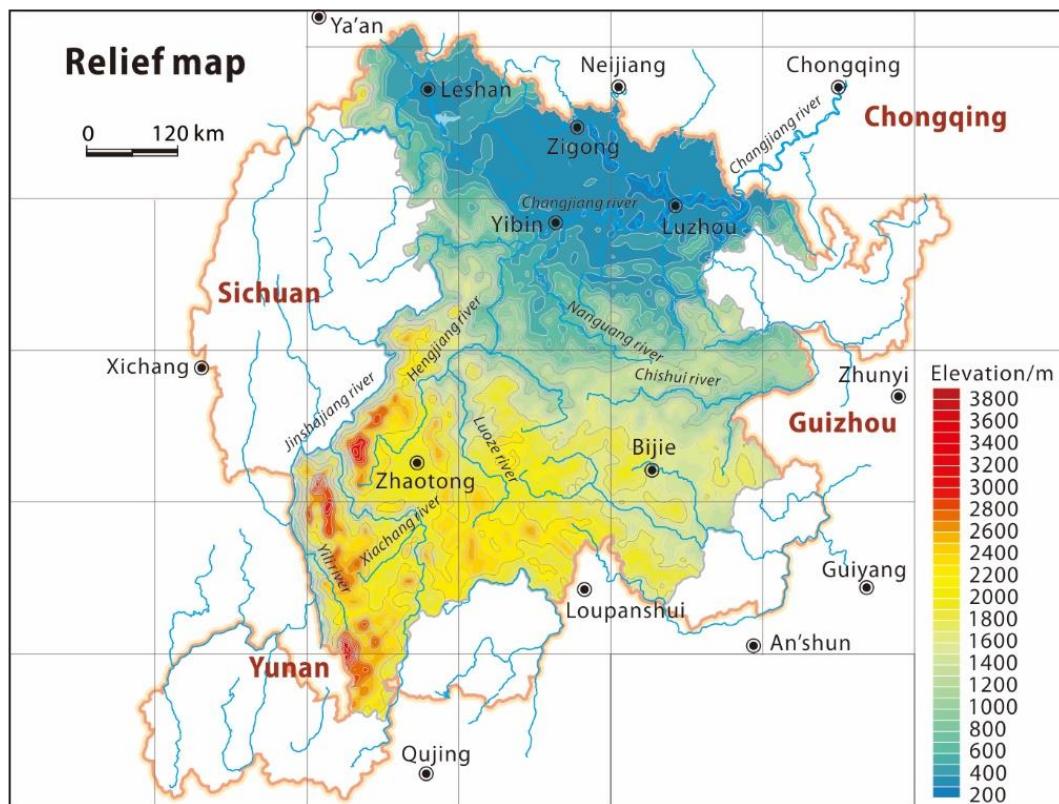


Fig. 1. Terrain distribution in the Zhaotong – Bijie – Yibin – Leshan – Luzhou area

Рис. 1. Распределение высот рельефа в районе Чжаотун – Бицзе – Ибинь – Лэшань – Лучжоу

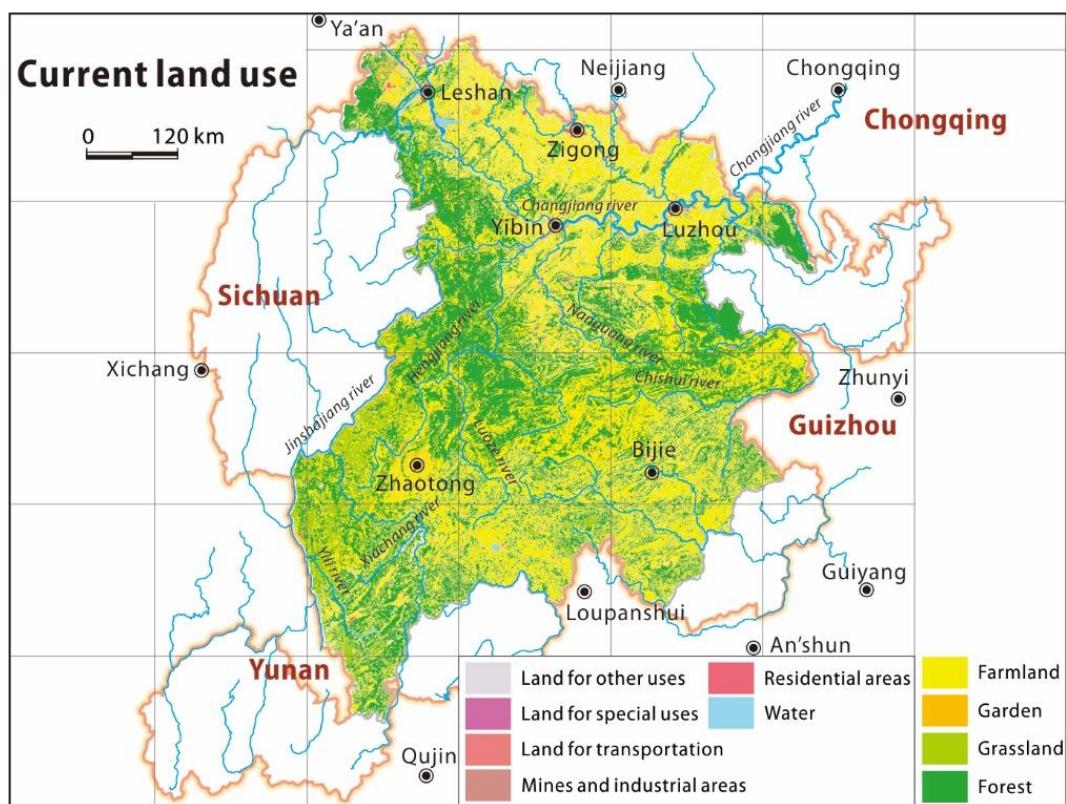


Fig. 2. Land-use types in the Zhaotong – Bijie – Yibin – Leshan – Luzhou area
Рис. 2. Типы землепользования в районе Чжаотун – Бицзе – Ибинь – Лэшань – Лучжоу

usually present in carbonaceous strata, comprising interbedded dolomite, dolomitic limestone, limestone and marl in the area. The area also features paragenetic or associated non-ferrous, rare and precious metal elements such as copper (Cu), iron (Fe), silver, gallium (Ga), cadmium (Cd) and germanium (Ge) [5, 6].

Basalt, carbonate and Pb-Zn-Ag deposits are mainly distributed in the mid- and high-elevation mountainous areas above 1,000 m (Fig. 3). The Emeishan large igneous province (LIP) resulted from a mantle-plume melting event spanning less than 1 Ma at approximately 259 Ma [7]. Spatially, Emeishan basalt is mainly distributed in Yunnan, Sichuan and Guizhou Provinces along the western margin of the Yangtze Craton. This region extends to Guangxi and Chongqing in the east and is bordered by the Ailaoshan – Red River fault to the west and the Longmenshan – Xiaojing River fault to the northwest. As it is near the Sanjiang tectonic belt, the Emeishan LIP's complex

geological history includes strong deformation and destructive events that resulted in approximately $0.25 \cdot 10^6$ km² exposed area. The basalt in the study area is located within the continental rift system in the Emeishan basalt zone [8], where the exposed area covered approximately 8,867 km² (Fig. 3) or approximately 10.46 % of the total study region; while the exposed carbonate rocks covered 20,934 km² or approximately 24.70 % of the study area.

The Geochemical Atlas of China^{1,2} and the Geochemical Survey Report of Chinese Farmland³ clearly show abnormal enrichment of metal elements in the soil and stream sediments in the Emeishan basalt and the southwestern carbonate areas. These areas have high metallic elemental contents relative to elsewhere in China.

Therefore, it is essential to study the epigenetic geochemical processes in these areas and the impact of Pb and Zn mining activities on the regional elemental distribution. The findings

¹ Xie X., Ren T., Sun H. Geochemical atlas of China. Beijing: Geological Publishing House, 2012. 120 p.

² Xie X., Cheng Z., Zhang L., et al. Geochemical atlas of 76 elements in Southwest China. Beijing: Geological Publishing House, 2008. 219 p.

³ China Geological Survey. Geochemical survey report on China's cultivated land (2015). Available from: <http://www.cgs.gov.cn/upload/201506/20150626/gdbg.pdf> [Accessed 25 June 2015].

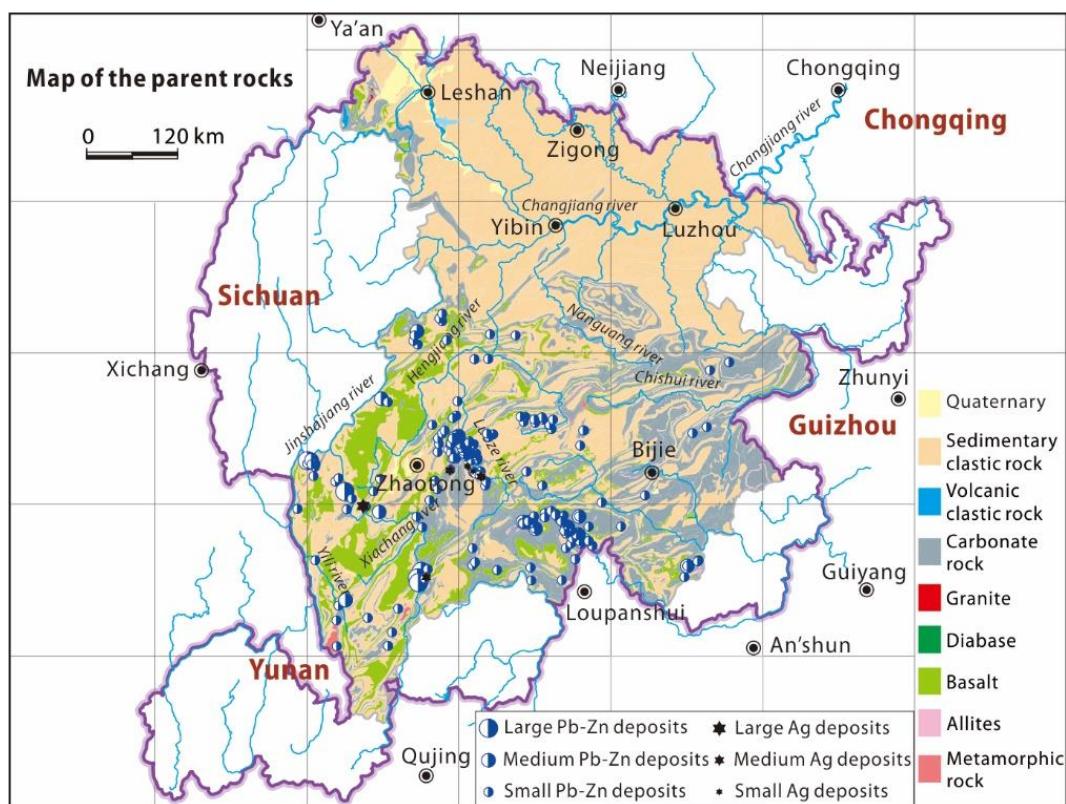


Fig. 3. Distribution map of the parent materials and Pb-Zn-Ag deposits in the Zhaotong – Bijie – Yibin – Leshan – Luzhou area

Рис. 3. Карта распределения материнских горных пород и месторождений Pb-Zn-Ag в районе Чжаотун – Бицзе – Ибинь – Лэшань – Лучжоу

can facilitate the advancements of the theories of epigenetic geochemical dynamics, as well as development of geochemical surveys and monitoring systems for land resources, and applications of exploratory geochemistry in natural resource management.

Data sources

The data used in this study were obtained through tests in accordance with the "Multi-Purpose Regional Geochemical Survey" specifications (1:250,000) (DZ/T 0258-2014)⁴. The sampling depths of the top and deep soil samples were 0–20 cm and 150–180 cm, respectively. The samples were analyzed in the Central Laboratory of the Institute of Geophysical and Geochemical Exploration, Chinese Academy of Geological Sciences. The tested elements and indicators included Ag, As, Au, B, Ba, Be, Bi, Br, Cd, Ce, Cl, Co, Cr, Cu, F, Ga, Ge, Hg, I, La, Li, Mn, Mo, N, Nb, Ni, P, Pb, Rb, S, Sb, Sc, Se, Sn, Sr,

Th, Ti, Ti, U, V, W, Y, Zn, Zr, SiO₂, Al₂O₃, TFe₂O₃, MgO, CaO, Na₂O, K₂O, TC, organic carbon (C_{org}) and pH. The schemes for analysis and quality control used in this study are as described in the references [9]. A quality assessment of the data, analyzed according to the prescribed procedures, showed that the data are reliable and passed the acceptance and database audits.

Mechanisms driving the macroscopic distribution of major elements

During complex physical and chemical weathering processes, soil parent materials can form in-situ residual soil. Alluvial and proluvial soils may also appear in downstream areas due to transportation and sedimentation processes when slopes and rivers are present. Deep soil is less affected by industrial and agricultural activities, in which elemental distribution is mainly controlled geologically. Typically, when there is no significant impact from human activities, the

⁴ Ministry of Land and Resources of the People's Republic of China. Code for multi-target regional geochemical surveys (1:250000) (DZ/T 0258-2014). Beijing: China Standard Press, 2015. 43 p.



elemental distribution patterns of the top soil reflects that of the deep soil. However, owing to the extensive and frequent contacts between the top soil and atmosphere, water bodies, organisms or human beings, the elemental distribution patterns in soil can be considerably modified. Emeishan basalt and carbonate rocks are the two most common soil parent materials in the study area. The dynamic processes of surface erosion, transportation and sedimentation, caused by marked elevation changes and biogeochemical effects of extensive forests, are a starting point for characterizing the mechanisms driving the macroscopic distribution of elements in this region.

Main weathering and soil formation processes of basalt and carbonate rocks. Emeishan basalt is mainly composed of basic plagioclase and pyroxene minerals with some olivine, amphibole and biotite. In an epigenetic environment, the physical weathering processes drive basic feldspar ($\text{Na}[\text{AlSi}_3\text{O}_8]-\text{Ca}[\text{Al}_2\text{Si}_2\text{O}_8]$) to fracture along the cleavage planes. Further, the chemical weathering processes cause basic feldspar decomposition, i.e., basic feldspar \rightarrow hydromica + K^+ , Na^+ , Ca^{2+} \rightarrow kaolinite (montmorillonite) + SiO_2 \rightarrow opal + gibbsite, leading to loss of K^+ , Na^+ , Ca^{2+} and H_2SiO_4 . Olivine ($(\text{Mg}, \text{Fe})_2\text{SiO}_4$) and pyroxene ($\text{Ca}(\text{Mg}, \text{Fe}, \text{Al})[\text{Si}, \text{Al}]_2\text{O}_6$) are unstable Fe and Mg minerals that are highly susceptible to weathering. During weathering and soil formation, especially under the action of carbonic acid, Ca^{2+} , Mg^{2+} and Fe^{2+} ions are first separated to form bicarbonates during decomposition, then dissolved in water and carried away. Under oxidation, the low-valent iron

in these minerals is oxidized to high-valent iron, forming hydrous iron oxides. These minerals remain in-situ to form red-, brown-, and hazel-colored soils.

The main mineral component of carbonate rocks is calcium carbonate. Under the long-term action of CO_2 -rich rainwater, calcium carbonate undergoes chemical dissolution ($\text{CaCO}_3 + \text{H}_2\text{O} + \text{CO}_2 \rightarrow \text{Ca}^{2+} + 2\text{HCO}_3^-$). Overall, 90 % of Ca^{2+} , Mg^{2+} and other dissolved substances are lost due to water transportation. The remaining materials that are insoluble in acids, such as quartz, feldspar, clay and Fe and Al oxides, remain on the surface to form soil. Therefore, the time used by the carbonate rock parent materials to form soil is up to 10 times that used by other parent materials [10, 11].

Basalt is located in the continental rift system in the Emeishan basalt area. Compared to its parent rock, the soil that basalt forms was rich in Al and Fe but depleted in Ca, Mg, Na, K and Si (Table 1). During soil formation from carbonate parent materials, approximately 96 % of Ca and 52 % of Mg were lost, whereas Fe, Al, Si, K and Na were enriched by 164, 5.5, 4, 16 and 2.9 times, respectively (Table 2).

Mechanisms driving the macroscopic distribution of Fe and Al. The above-mentioned enrichment and depletion characteristics of major elements during soil formation have been clearly verified through their spatial distributions. The deep and top soils above the basalt and limestone parent materials were considerably enriched in Fe and Al, indicating significant control by soil parent materials over the distributions

Table 1. Chemical compositions of major elements in Emeishan basalt and soil

Таблица 1. Химический состав основных элементов в Эмейшанских базальтах и почвах

Statistics	W _B / %						
	SiO ₂	Al ₂ O ₃	TFe ₂ O ₃	MgO	CaO	Na ₂ O	K ₂ O
Number of samples	859	859	859	859	859	859	859
Minimum	27.83	9.4	6.48	0.32	0.09	0.06	0.09
Maximum	67.47	25.39	31.41	8.73	14.04	3.2	3.5
Mean	42.17	17.16	17.4	1.14	0.73	0.39	1.08
Median	41.6	17.56	17.97	1.01	0.52	0.29	1.04
Standard deviation	6.43	2.28	3.26	0.6	0.94	0.35	0.36
Average chemical composition of the Emeishan basalt ($n = 416$)*	50.03	13.89	14.06	5.17	8.45	2.84	1.33
Soil / Rock	0.84	1.24	1.24	0.22	0.09	0.14	0.81

Note. * – see reference [8].

Примечание. * – см. источник [8].

**Table 2. Chemical compositions of major elements in carbonate rocks and soil****Таблица 2. Химический состав основных элементов в карбонатных породах и почвах**

Sampling medium	Statistics	w _B / %						
		SiO ₂	Al ₂ O ₃	TFe ₂ O ₃	MgO	CaO	Na ₂ O	K ₂ O
Carbonate	Number of samples	34	34	34	34	34	34	34
	Minimum	9.75	1.9	0.01	0.03	0.1	0.02	0.01
	Maximum	96.21	4.66	0.43	7.23	55.39	0.06	1.31
	Mean	16.13	2.62	0.05	0.93	48.33	0.04	0.06
	Median	10.03	2.49	0.01	0.37	52.19	0.04	0.01
	Standard deviation	20.34	0.48	0.1	1.43	12.89	0.01	0.23
Soil	Number of samples	495	495	495	495	495	495	495
	Minimum	30.72	5.88	1.79	0.13	0.12	0.05	0.17
	Maximum	87.18	26.76	24.48	1.33	22.13	0.73	3.99
	Mean	64.34	14.36	7.54	0.45	1.99	0.12	1.01
	Median	63.99	14.24	6.81	0.43	0.37	0.09	0.78
	Standard deviation	12.68	4.3	3.82	0.2	3.9	0.09	0.7
Soil / Rock		3.99	5.47	164.3	0.48	0.04	2.87	16.01

of Fe and Al (Figs. 4 and 5). Furthermore, Fe and Al contents in soil increased with elevation (Fig. 6), suggesting that during soil formation, Fe and Al did not substantially migrate from high elevations to the base of mountains. Therefore, the high Fe and Al contents in soil were the result of secondary enrichment due to parent material weathering.

The top soil is in direct contact with the atmosphere and biosphere and affected by industrial and agricultural activities. During soil formation, the soluble base cations in the top soil are more likely to be washed away, resulting in lower pH (5.82) than the deep soil (6.04). Additionally, irrespective of ground cover types (farmlands, forests, grasslands, etc.), the root system of vegetation is mainly concentrated at a shallow depth of tens of centimeters. Moreover, the root and microbial growth activities of crops can produce large quantities of organic acids, adding to the already highest levels of acid rain in China the study area receives. In acidic environments, Fe²⁺ and Fe³⁺ are formed during the weathering of Fe rich ferromagnesian minerals. The migration capacity of Fe²⁺ is much greater than that of Fe³⁺, and exchangeable Al is more likely to enter the soil solution and migrates with water. Together, these factors were suggested as the main mechanism driving the lowering of TFe₂O₃ and Al₂O₃ concentrations in the top soil, in this case, by 4.6 % and 4.9 %, respectively (Fig. 6), compared to the top soil.

Mechanisms driving the macroscopic distributions of Na, K, Ca, Mg and Si, and pH. Because Na, K, Ca and Mg are soluble in water, these elements are prone to being washed away and can easily enter the epigenetic environment during weathering and soil formation. The levels of some elements such as Ca, Na (Fig. 7), K and Mg (not shown) in the top and deep soils increased rapidly with decreasing elevations (Fig. 7), suggesting that these elements mainly entered the surface water system and migrated from high- to low-elevation areas under the action of hydrodynamic forces.

Owing to their different geochemical properties, the above-mentioned elements have significantly different migration and transportation pathways after entering the epigenetic environment. Although Na and K have similar geochemical properties, the hydration energy of Na (indicating how closely the ions are surrounded by water molecules) is greater than that of K. A larger hydration energy means the ion is more difficult to be adsorbed. Therefore, in an epigenetic environment, Na is more likely to migrate with water, whereas K is more easily adsorbed by clay minerals or colloids. This is also the main reason Na was concentrated near the lowest terrain along the Yangtze River (Fig. 8, a), whereas K only occurred in low concentrations in the same area (Fig. 8, b).

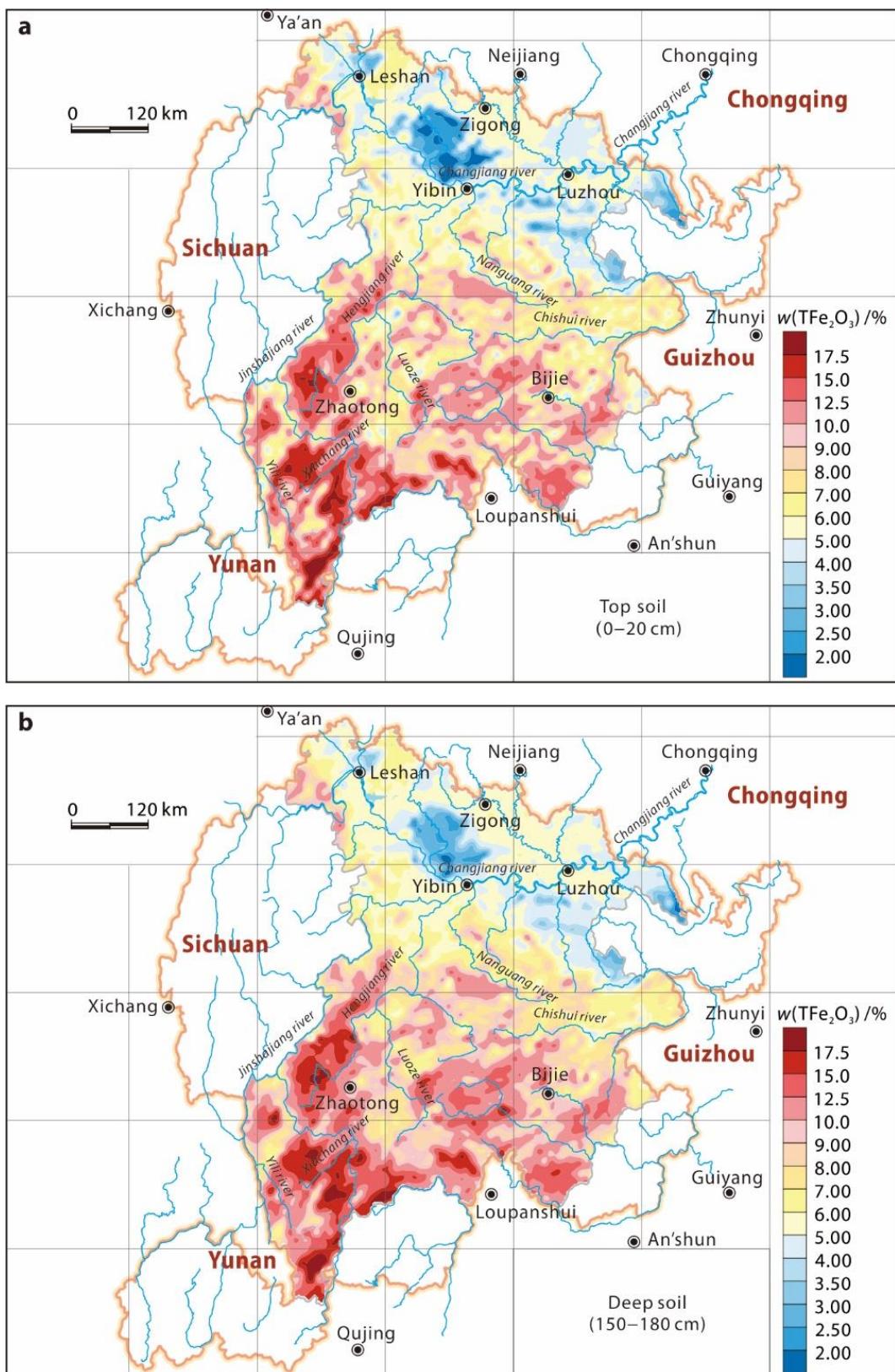


Fig. 4. The TFe_2O_3 distribution pattern in top (0–20 cm) (a) and deep (150–180 cm) (b) soils of the Zhaotong – Bijie – Yibin – Luzhou – Leshan area

Рис. 4. Схема распределения TFe_2O_3 в верхних (0–20 см) (а) и глубоких (150–180 см) (б) почвах района Чжаотун – Бицзе – Ибинь – Лучжоу – Лэшань

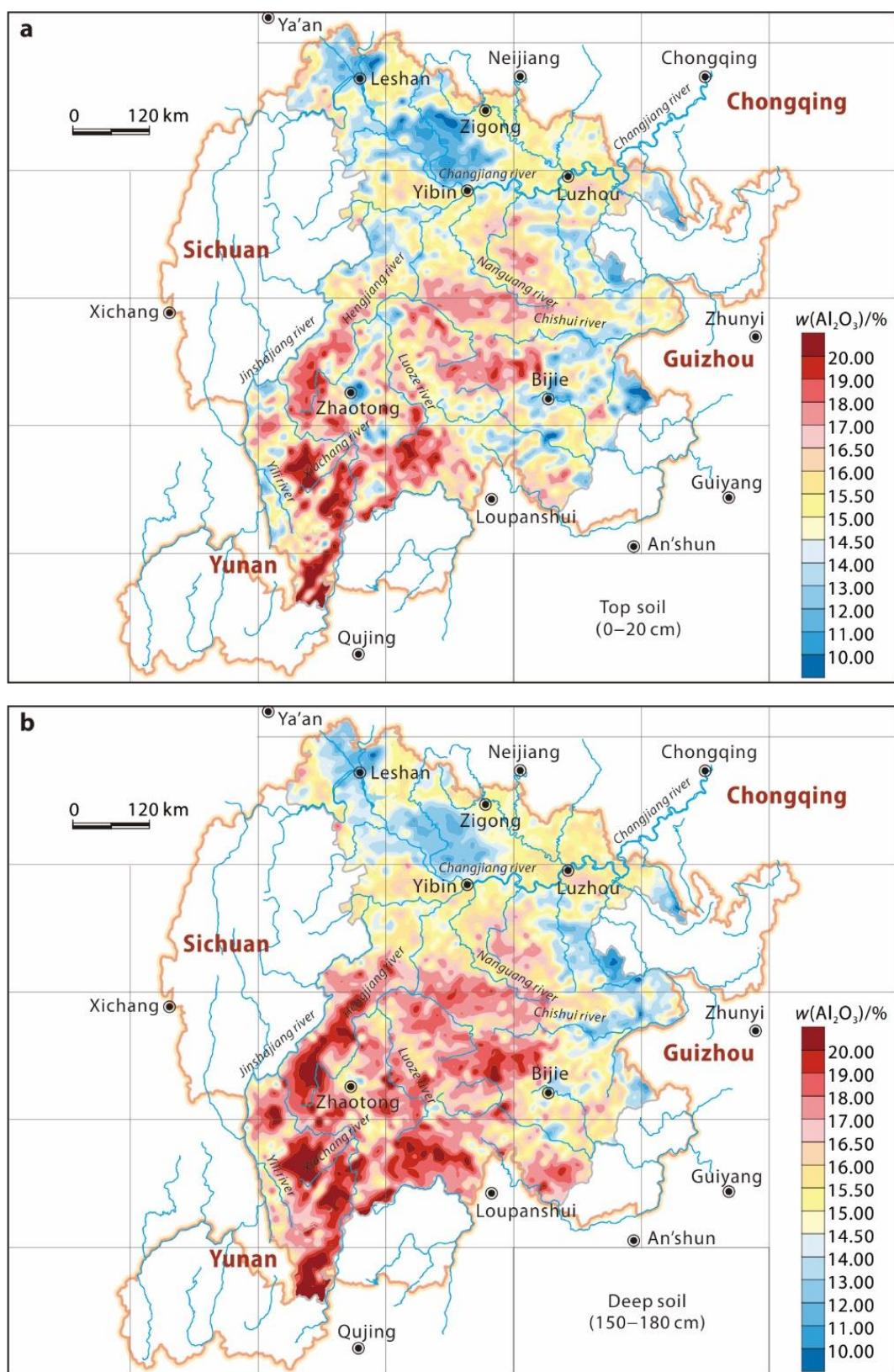


Fig. 5. The Al_2O_3 distribution pattern in top (0–20 cm) (a) and deep (150–180 cm) (b) soils of the Zhaotong – Bijie – Yibin – Luzhou – Leshan area

Рис. 5. Схема распределения Al_2O_3 в верхних (0–20 см) (а) и глубоких (150–180 см) (б) почвах района Чжаотун – Бицзе – Ибинь – Лучжоу – Лэшань

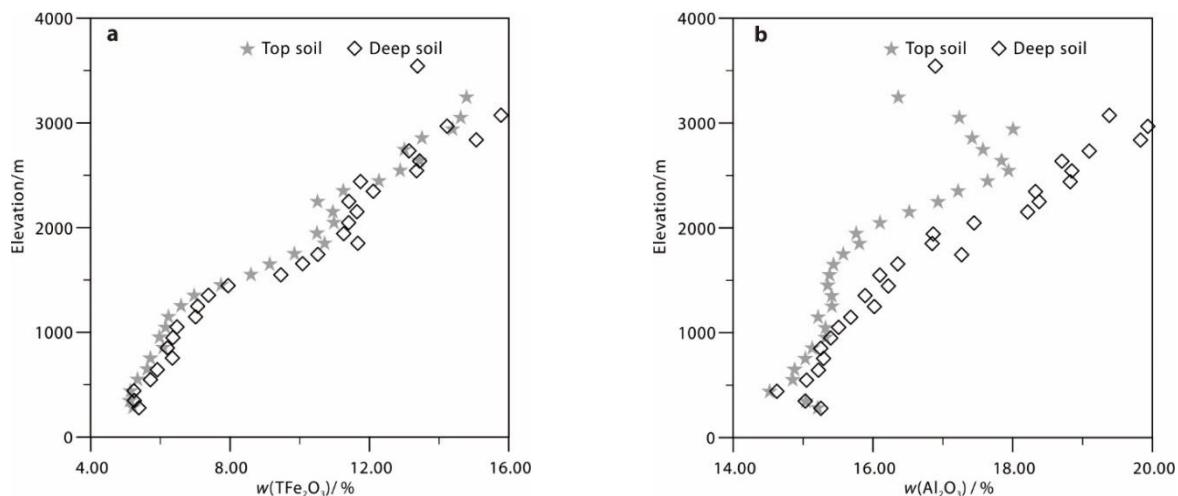


Fig. 6. Plot of $T\text{Fe}_2\text{O}_3$ (a) and Al_2O_3 (b) contents in top and deep soils vs. elevation in the Zhaotong – Bijie – Yibin – Luzhou – Leshan area

Рис. 6. График содержания $T\text{Fe}_2\text{O}_3$ (а) и Al_2O_3 (б) в верхних и глубоких почвах в зависимости от высоты в районе Чжаотун – Бицзе – Ибинь – Лучжоу – Лэшань

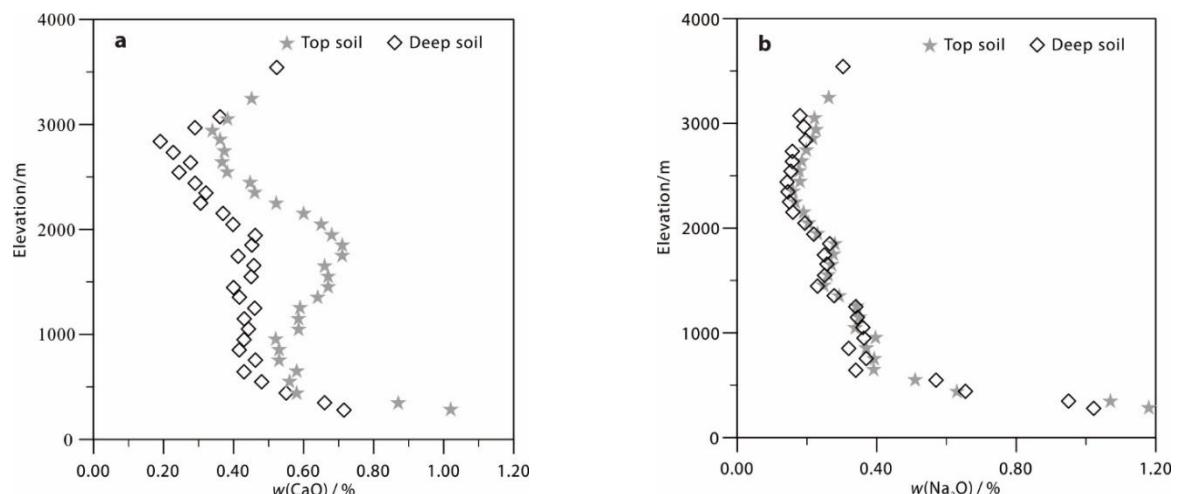


Fig. 7. Plot of CaO (a) and Na_2O (b) contents in top and deep soils vs. elevation in the Zhaotong – Bijie – Yibin – Luzhou – Leshan area

Рис. 7. График содержания CaO (а) и Na_2O (б) в верхних и глубоких почвах в зависимости от высоты в районе Чжаотун – Бицзе – Ибинь – Лучжоу – Лэшань

The solubilities of sodium chloride and sodium hydroxide at room temperature were 36 g/NaCl and 109 g/NaOH in 100 g water, respectively, while that of calcium bicarbonate was 16.6 g/CaHCO₃ in 100 g water. These compounds appeared mainly in the forms of Ca²⁺, Cl⁻, Na⁺ and OH⁻ in natural water. As temperature rises, Ca²⁺ precipitates before Na²⁺. All Na, K, Ca and Mg were lost and enter into the water system during weathering and soil formation. However, due to solubility differences, Ca²⁺ and Na⁺, Ca and Mg (not shown) were mainly concentrated in the soils along both sides of the tributary systems, e.g. the Jinsha and Chishui Rivers, by the action of hydrodynamics (Fig. 9, a). Contrarily, Na migrated over a long distance and concentrated within the

lowest-lying areas near the Yangtze River (Fig. 8, a).

Potassium (K⁺), Na⁺, Ca²⁺, Mg²⁺ and other basic ions can all neutralize H⁺ and prevent and regulate the acidification of water bodies and soil. Weathering and soil formation of the widely distributed basalt and carbonate rocks provide sufficient basic ions, such as K⁺, Na⁺, Ca²⁺ and Mg²⁺, to the surface water for buffering acidity and maintaining moderately alkaline conditions in the soils along both sides of the water systems. Figure 9, b shows that soils on both sides of the Yangtze River tributaries, including the Jinsha, Hengjiang, Nanguang and Chishui Rivers, were moderately alkaline. These regions overlap precisely with the Ca rich areas, a clear indication of H⁺ neutralization by Ca²⁺ and other basic ions.

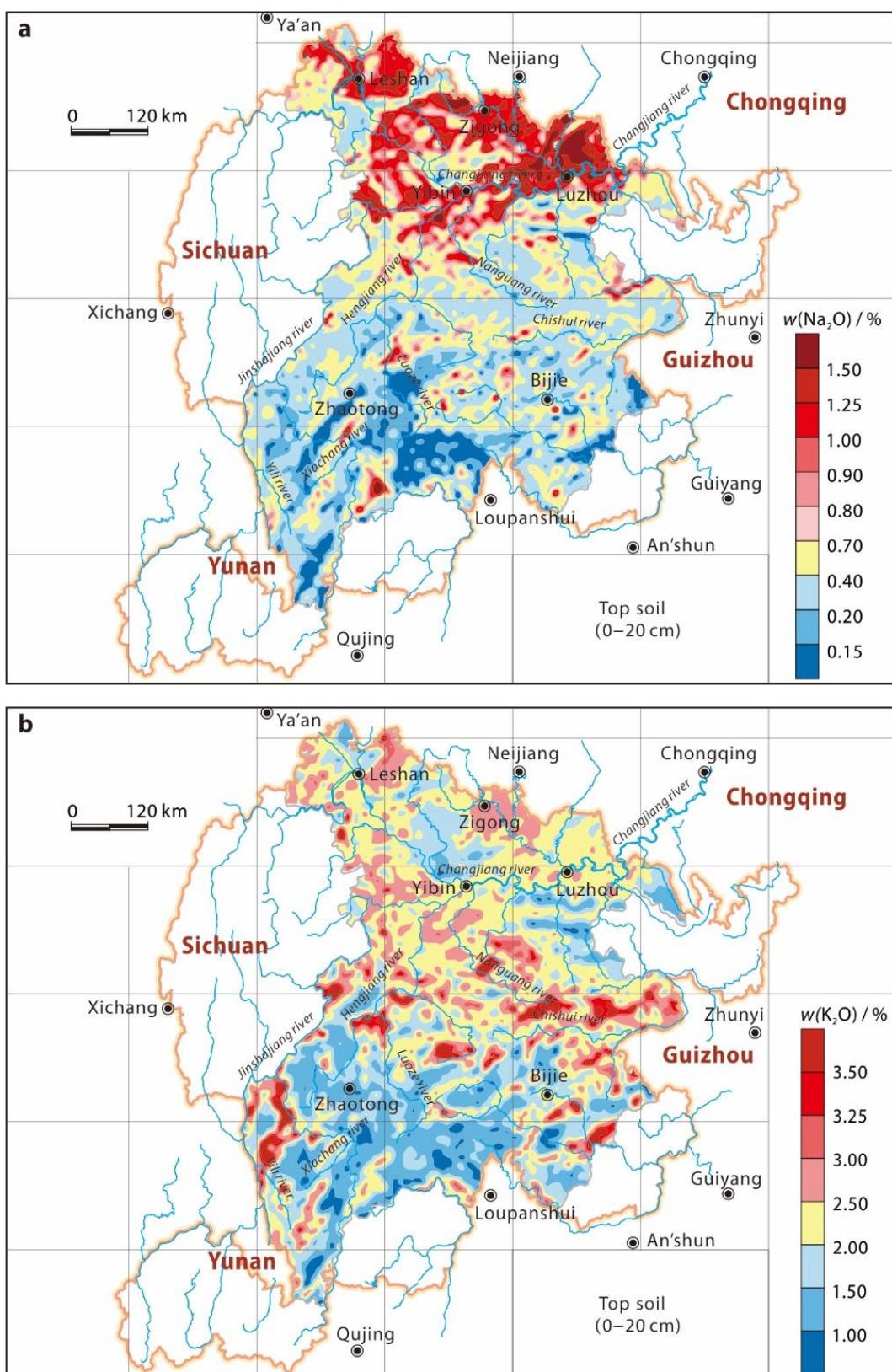


Fig. 8. Distribution pattern of Na_2O (a) and K_2O (b) in the top (0–20 cm) soil of the Zhaotong – Bijie – Yibin – Luzhou – Leshan area

Рис. 8. Схема распределения Na_2O (а) и K_2O (б) в верхних (0–20 см) почвах в районе Чжаотун – Бицзе – Ибинь – Лучжоу – Лэшань

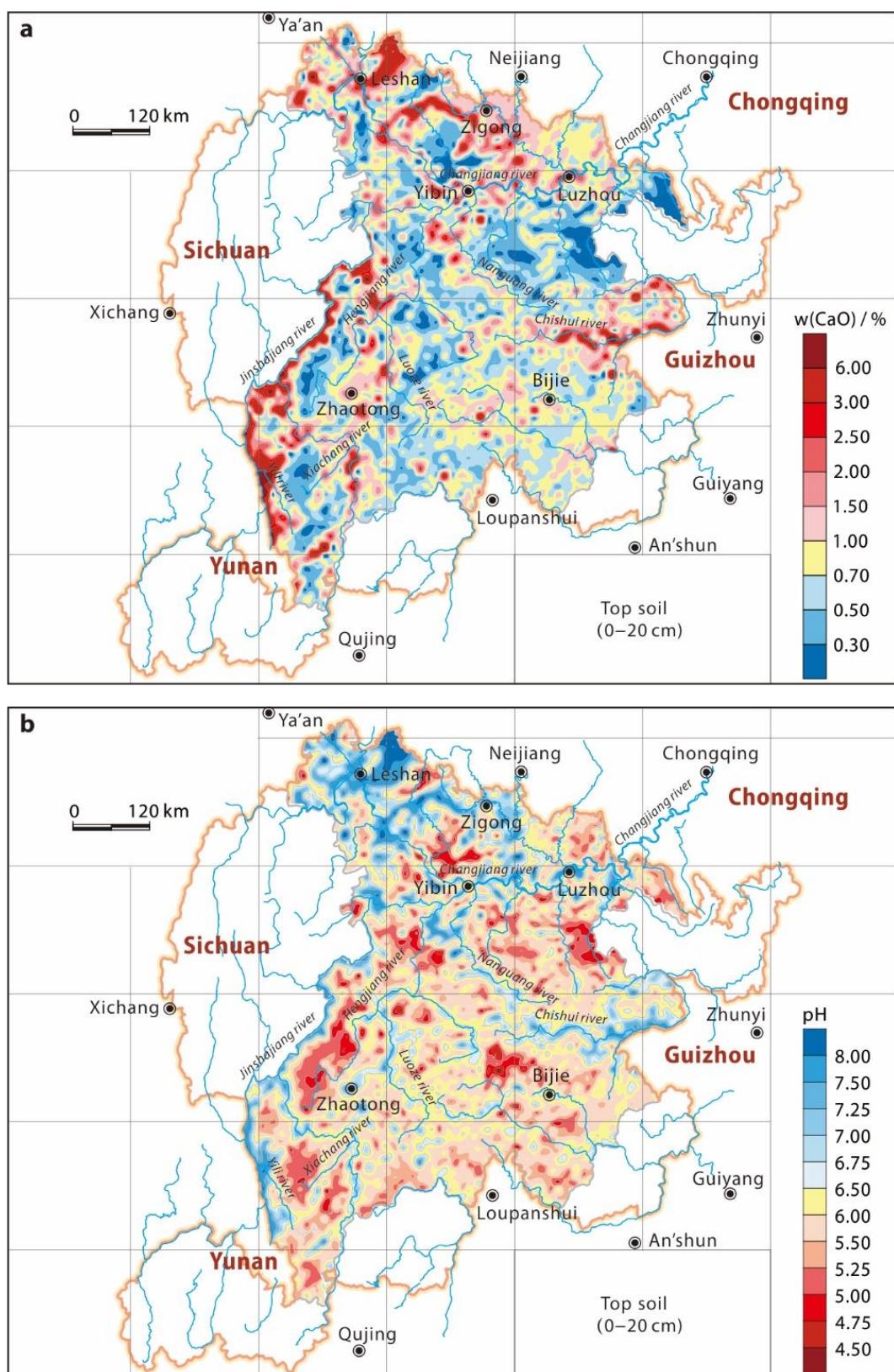


Fig. 9. Distribution pattern of CaO (a) and pH levels (b) in the top (0–20 cm) soil of the Zhaotong – Bijie – Yibin – Luzhou – Leshan area

Рис. 9. Схема распределения CaO (а) и уровней pH (б) в верхних (0–20 см) почвах района Чжаотун – Бицзе – Ибинь – Лучжоу – Лэшань



The insoluble materials formed via weathering and soil formation from carbonate rocks mainly include extremely fine-grained quartz, feldspar and clay [10, 11]. The study area has abundant annual rainfall, and the terrain exhibits strong undercutting. Silicone content increased

rapidly as elevation decreases (Fig. 10), indicating that, under the action of epigenetic hydrodynamics, insoluble minerals, such as quartz and feldspar, migrated along the water system and deposited in the lower-lying terrain in the Leshan – Yibin – Luzhou area (Fig. 11).

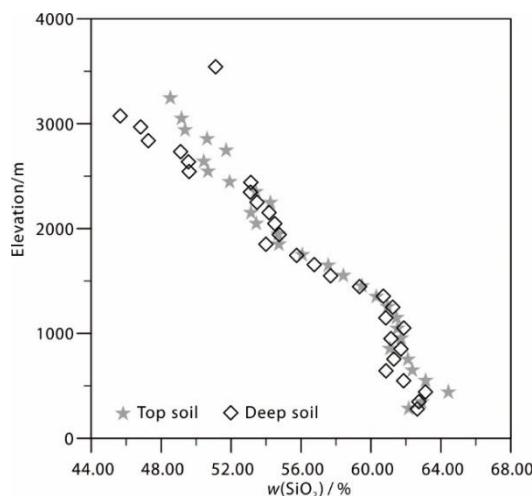


Fig. 10. Plot of SiO_2 content in top and deep soils vs. elevation in the Zhaotong – Bijie – Yibin – Luzhou – Leshan area

Рис. 10. График содержания SiO_2 в верхних и глубоких почвах в зависимости от глубины в районе Чжаотун – Бицзе – Ибинь – Лучжоу – Лэшань

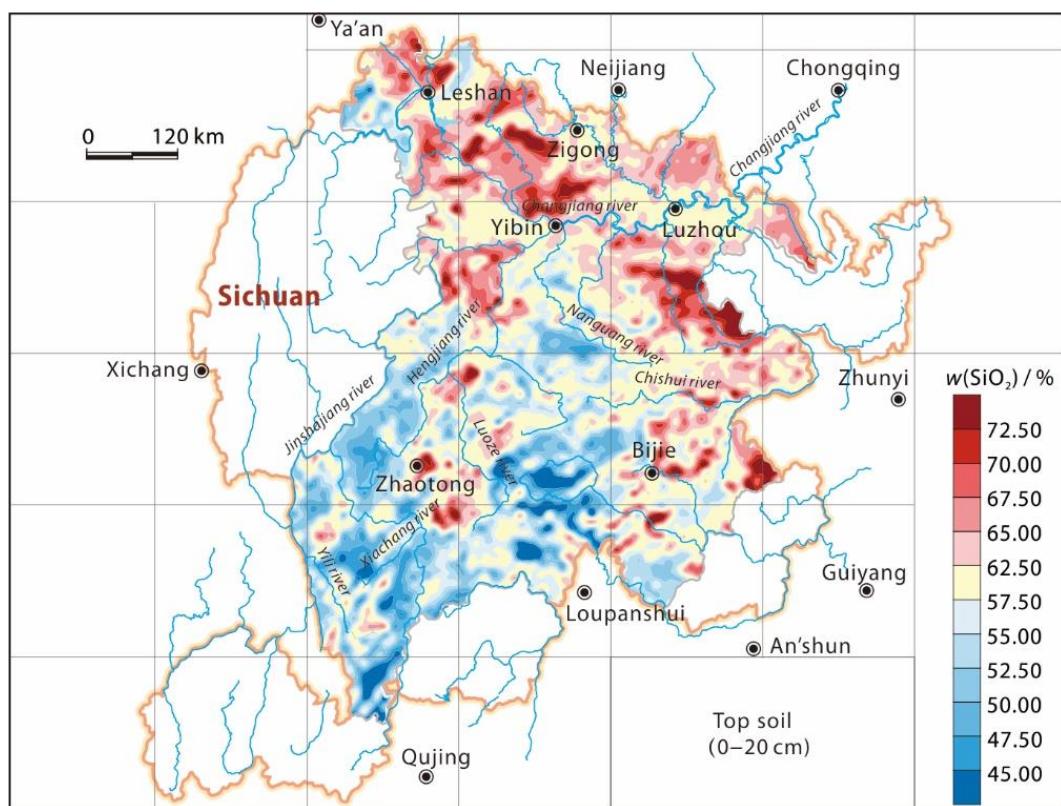


Fig. 11. Distribution pattern of SiO_2 in the top (0–20 cm) soil in the Zhaotong – Bijie – Yibin – Luzhou – Leshan area

Рис. 11. Схема распределения SiO_2 в верхних (0–20 см) почвах в районе Чжаотун – Бицзе – Ибинь – Лучжоу – Лэшань

Mechanism driving the macroscopic distribution of Corg, N, S and P. According to the procedures of the National Land Quality Geochemical Survey, we analyzed the levels of 52 elements, pH and C_{org}⁵. Thirty-five of the elements participate in biogeochemical processes and have clear biological effects. They included Na, K, Be, Mg, Ca, V, Cr, Mo, W, U, Mn, Fe, Co, Ni, Cu, Ag, Zn, Cd, Hg, B, Al, Tl, C, Si, Sn, Pb, N, P, As, Sb, S, Se, F, Cl and I [12]. In particular, C, N, P and S were the main elements involved in the biogeochemical cycle.

In the study area, the C_{org}, N, S and P contents in the top soil were significantly greater than in the deep soil. As elevation increases, the elemental contents in both soils gradually in-

creased. The absolute increase of the four elements in the top soils of the mid- and high-elevation mountainous areas above 2,000 m were significantly greater than that of the low-elevation areas (Fig. 12). In the major agricultural production region, the top soil was only slightly enriched in all four elements. Organic carbon (Fig. 13), N (Fig. 14), S and P (not shown) were significantly enriched in the top soils of the Zhaotong – Bijie forest and grassland areas above 2,000 m.

Carbohydrates, lipids, proteins and nucleic acids are the four basic substances essential for life; and C, O, H, N, P and S are the major elements required for the synthesis of these basic substances. In the biogeochemical process of plant growth, C and N are mainly involved in the

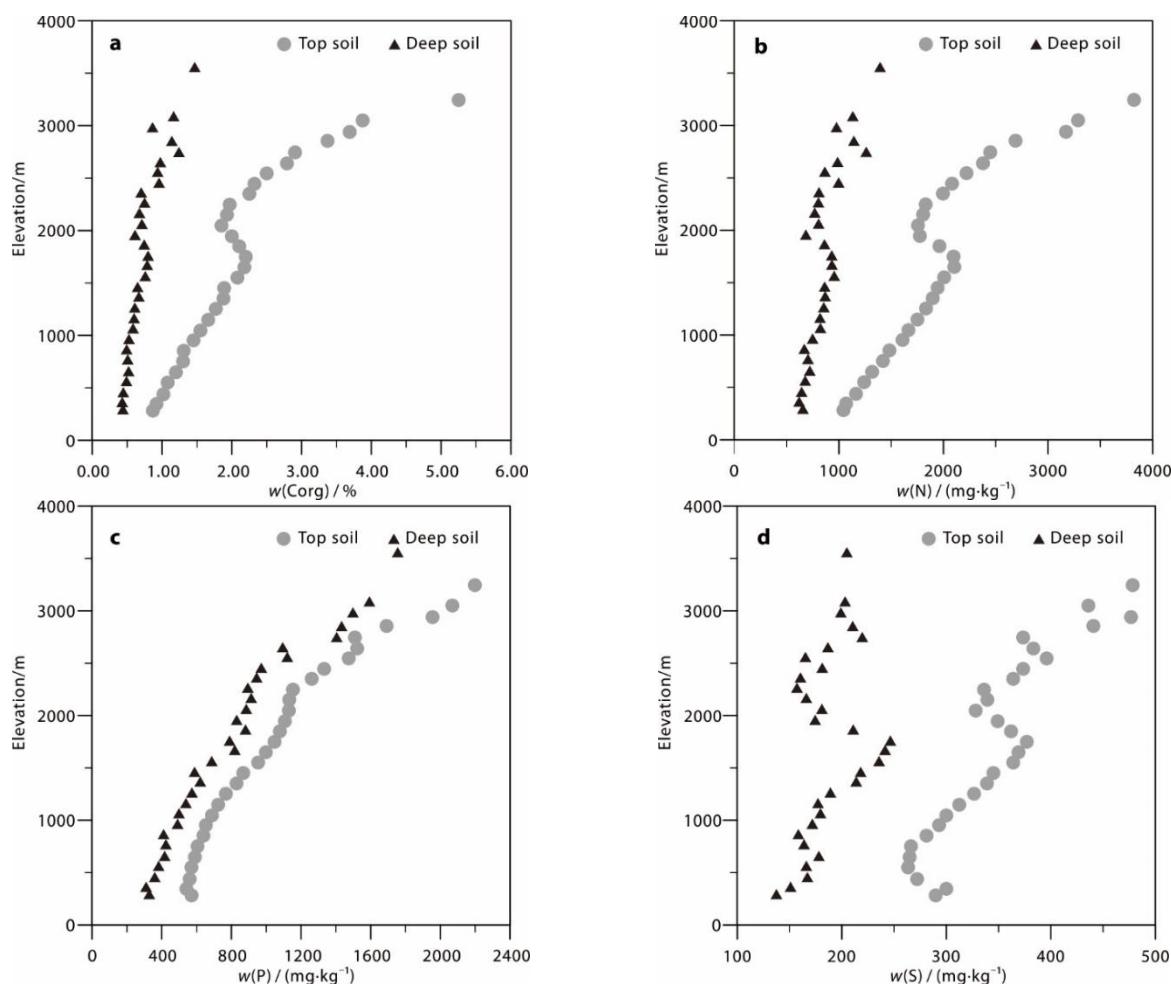


Fig. 12. Plot of C_{org} (a), N (b), P (c) and S (d) contents in the top and deep soils vs. elevation in the Zhaotong – Bijie – Yibin – Luzhou – Leshan area

Рис. 12. График содержания C_{org} (а), N (б), P (в) и S (д) в верхних и глубоких почвах в зависимости от глубины в районе Чжаотун – Бицзе – Ибинь – Лучжоу – Лэшань

⁵ Ministry of Land and Resources of the People's Republic of China. Code for multi-target regional geochemical surveys (1:250000) (DZ/T 0258-2014). Beijing: China Standard Press, 2015. 43 p.

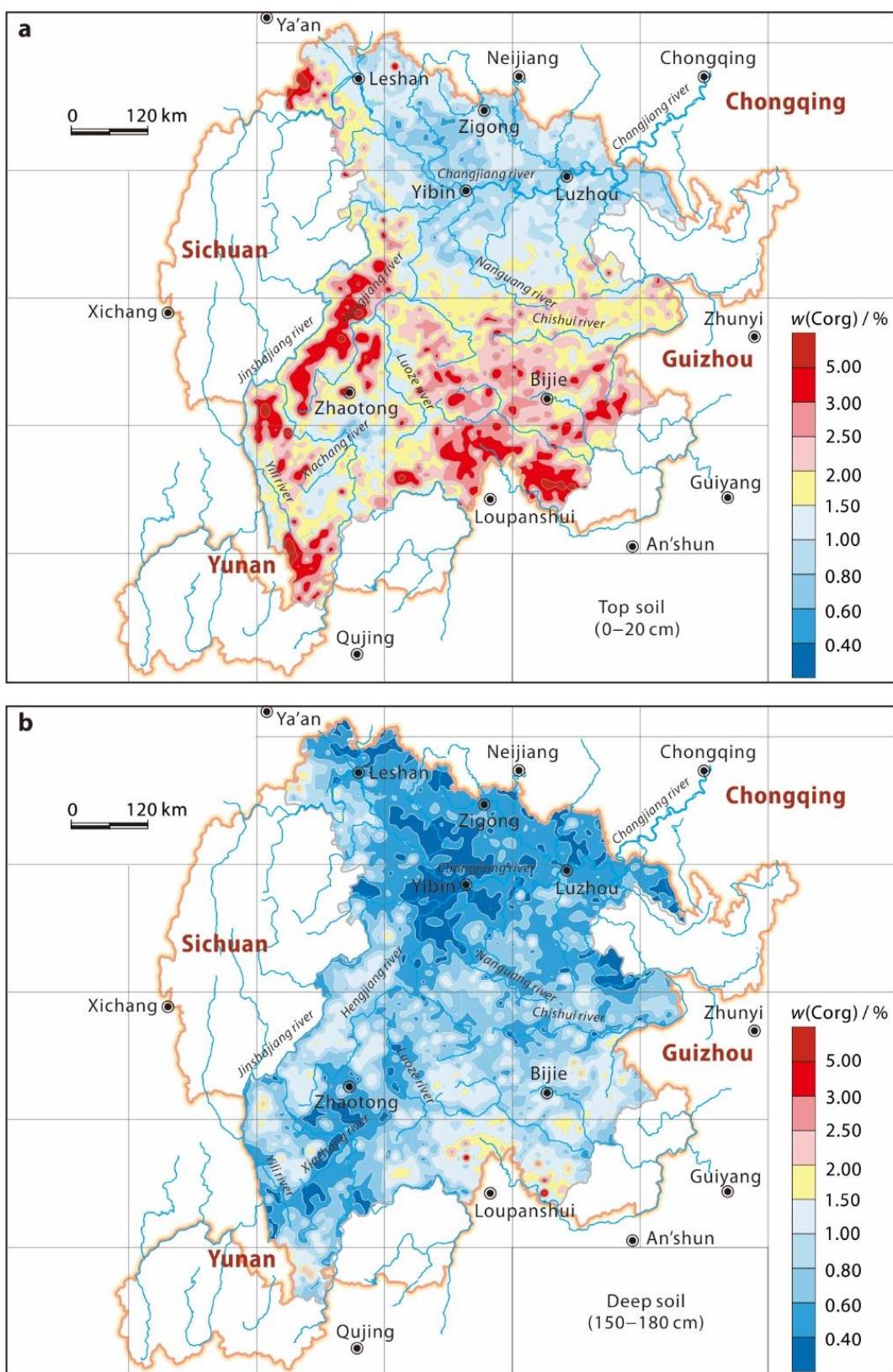


Fig. 13. Distribution pattern of C_{org} in the top (0–20 cm) (a) and deep (150–180 cm) (b) soils of the Zhaotong–Bijie–Yibin–Luzhou–Leshan area

Рис. 13. Схема распределения C_{org} в верхних (0–20 см) (а) и глубоких (150–180 см) (б) почвах в районе Чжаотун – Бицзе – Ибинь – Лучжоу – Лэшань

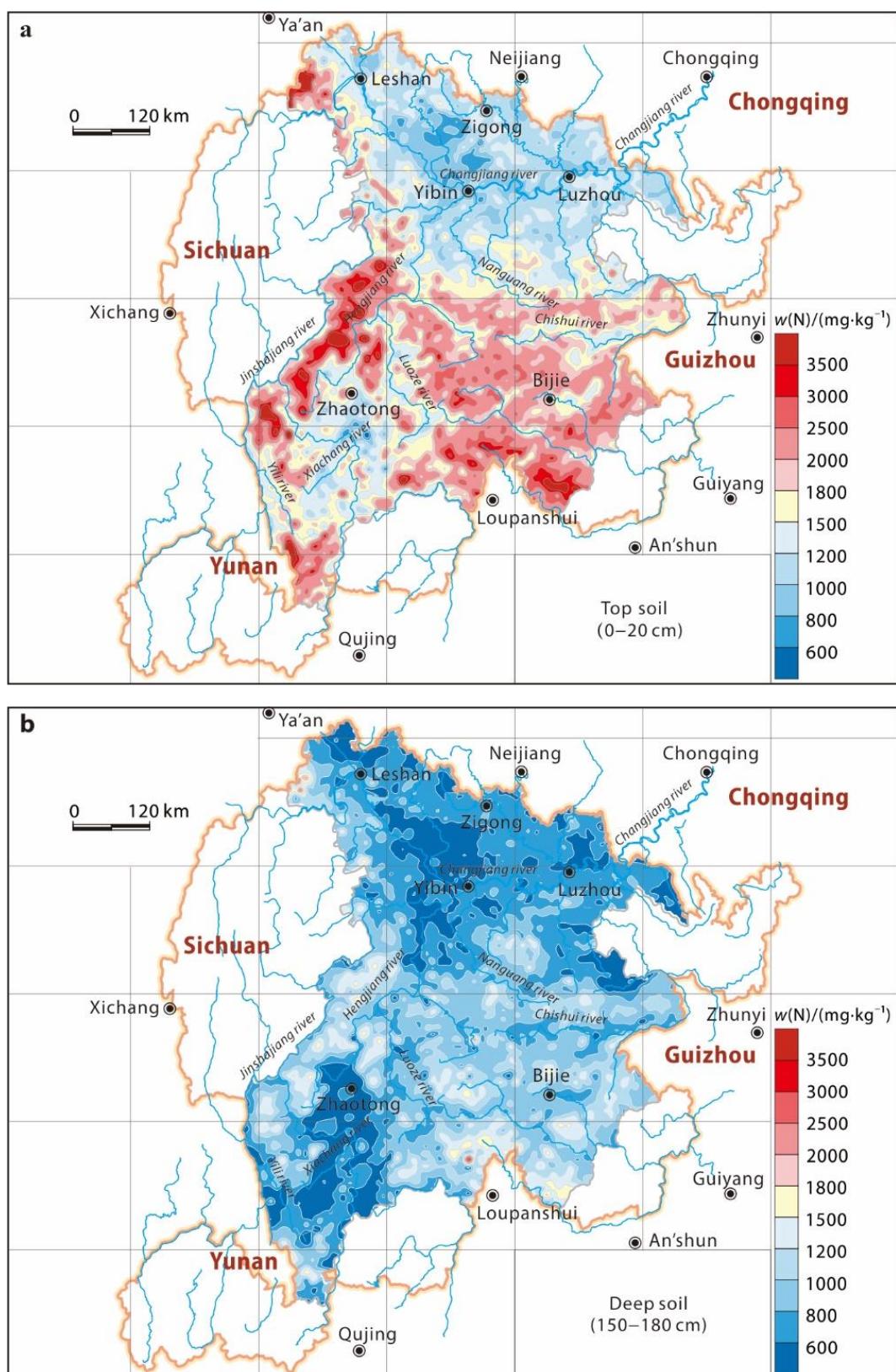


Fig. 14. Distribution pattern of N in the top (0–20 cm) (a) and deep (150–180 cm) (b) soils of the Zhaotong – Bijie – Yibin – Luzhou – Leshan area

Рис. 14. Сема распределения N в верхних (0–20 см) (а) и глубоких (150–180 см) (б) почвах в районе Чжаотун – Бицзе – Ибинь – Лучжоу – Лэшань



synthesis of carbohydrates and lipids, while S and P are needed to synthesize proteins and nucleic acids. Thus, the C/N ratio remains fixed in the plant body (C:N = 15). The functions of C, N, S and P render them to follow nearly identical evolutionary patterns in plant production. Although a large amount of chemical fertilizers (mainly nitrogen fertilizers) have been used in agricultural production in China in the last 30 years [13], analyses clearly demonstrate that C_{org} , N, S and P enrichment in the top soils of the Zhaotong – Bijie – Yibin – Luzhou – Leshan area is driven by the biogeochemical processes of forest and grassland ecosystems. Despite minor accumulation of C_{org} , N, S and P in the top soils of the Yibin – Luzhou – Leshan agricultural area, the accumulation effects attributed to intensive agricultural activities are significantly smaller than those naturally occurring in forest and grassland ecosystems.

Mechanism driving the macroscopic distribution of Cl, Br and I

The Cl, Br and I concentrations in the top soils of the study area were 23.3 %, 51.1 % and 23.5 %, respectively, higher than that in the deep soil; however, the F content was slightly lower in the top soil (-2.8 %).

The combined analyses of elevation variations and the F, Cl, Br and I contents in the top and deep soils showed that the F content was basically the same at different elevations, but highest at around 1,500 m above sea level, indicating that F does not change significantly with elevation in an epigenetic environment (Fig. 15, a). Hence, F concentrations showed consistent spatial distribution patterns in both soils (not shown). Moreover, F rich areas coincided with the carbonate rich areas. Fluorine distribution is mainly controlled by the carbonate parent materials.

Fluorine, Cl, Br and I are halogen elements known by their high chemical reactivity. Chlorine often exists as a monovalent anion (Cl^-) as well as $Cl(V)$ and $Cl(VII)$ species in the natural environment. Chlorine released during soil formation is mostly in water-soluble form and eventually migrates into the ocean along with water. Therefore, the Cl contents in marine sediments or sedimentary rocks are relatively high. We found that Cl, Br and I levels in the top soil were all significantly

higher than in the deep soil. However, chlorine content increased with decreasing elevation (Fig. 15, b), indicating Cl migration from medium and high elevations to the low hilly areas, whereas Br and I contents increased with increasing elevation (Fig. 15, c,d).

The Cl distribution pattern showed that it had significantly enriched the top soils on both sides of the Yangtze River and in the Pd-Zn-Ag deposit in the Leshan – Yibin – Luzhou area (Fig. 16), consistent with extensive distribution of Cl rich carbonate rocks in the study area. Chlorine released during weathering and soil formation is concentrated along both sides of the Yangtze River, due to the action of hydrodynamic forces, and forms an ionic compound with Na. This is the primary reason we detected abnormally high levels of Cl and Na (Fig. 8, a) on both sides of the Yangtze River.

The Cl anomaly region between the Luoze and Xiaochang Rivers is near a Pd-Zn-Ag mine cluster (Fig. 3). A study on the mineral composition of the deposits found that chlorargyrite exists in the oxidation zone of the large Pb-Zn-Ag deposits in Yinchangpo, Guizhou Province [14]. The high Cl content in chlorargyrite (24.7 %) suggested that natural weathering and mining activities might have driven the high degree of Cl enrichment in the deposits.

Due to the impact of the parent materials, the deep soil above the basalt and carbonate source rocks were generally enriched in Br and I (Figs. 17, b and 18, b). In the top soil, especially in mid-alpine forests with basalt parent materials, Br and I exhibited distinct cumulative distribution patterns (Figs. 17, a and 18, a).

In the natural environment, Br and I contents in the soil are usually much higher than in the parent rocks. According to classical geochemical theories, soil Br and I are believed to mainly come from the atmosphere [15], while atmospheric Br and I originate from ocean evaporation [16]. We found the soil contents of both elements gradually increased with increasing elevation, especially above 2,000 m, indicating high mountain blockage and abundant rainfall are the main reasons for the high Br and I soil contents. Bromine and I in the natural environment mainly exist as compounds. Alpine terrain and precipitation scouring can enable iodine compounds to enter water

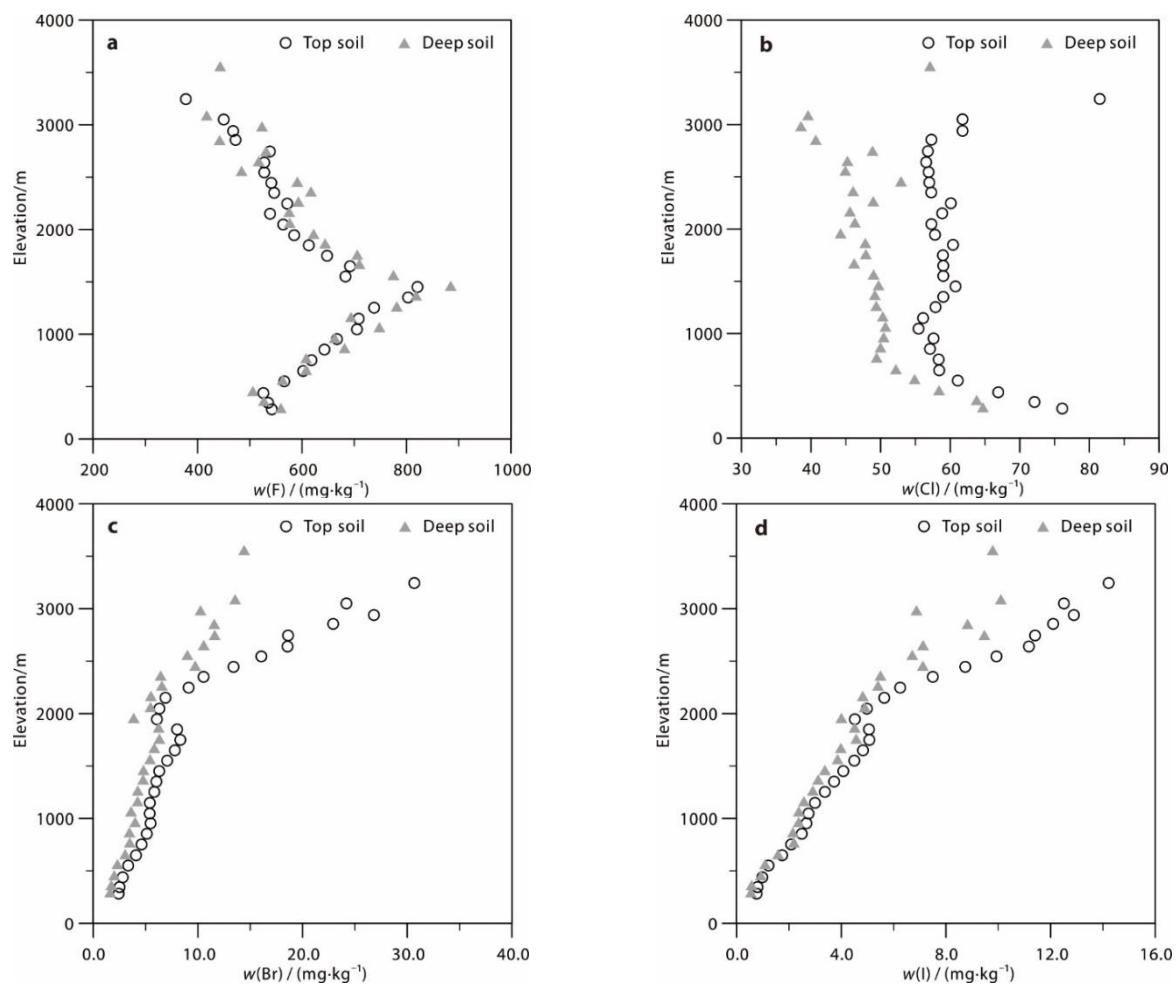


Fig. 15. Plots of F (a), Cl (b), Br (c) and I (d) contents in the top and deep soils vs. elevation in the Zhaotong – Bijie – Yibin – Luzhou – Leshan area

Рис. 15. График содержания F (а), Cl (б), Br (в) и I (д) в верхних и нижних почвах в зависимости от глубины в районе Чжакотун – Бицзе – Ибинь – Лучжоу – Лэшань

systems and flow into the ocean. However, the increasing Br and I contents in the top soil of the Zhaotong – Bijie alpine valley and low Br and I contents in the soils along the Yangtze River (Fig. 15, c,d), clearly indicated that Br and I do not exist as water-soluble compounds in soil.

A literature review suggests that sediments rich in organic matter are strongly enriched with iodine; such relationship can be used to determine iodine-holding ability of soils [17]. Indeed, we found positive linear correlation between C_{org} and Br ($R^2 = 0.92$) or I ($R^2 = 0.88$) in the top soil of the study area, confirming Br and I enrichments via strong adsorption (Fig. 19). The C_{org} contents in mid- and high-elevation alpine forests and grasslands (Fig. 13, a) closely aligned spatially with Br and I enrichments, thus further suggested that Br and I mainly occur in their adsorbed form. Iodine is restricted to the medium and high elevation areas due to soil organic

matter adsorption, making it difficult to enter the piedmont basin. This is also the main reason for the local iodine deficiency in the piedmont basin [18].

Mechanisms driving the macroscopic distribution of heavy metals

Heavy metals are metal elements with a density of 4.5 g/cm^3 or more. Of the 60 naturally occurring metal elements with atomic numbers from 23 (V) to 92 (U), fifty-four have a density greater than 4.5 g/cm^3 . The following 10 metals are classified as heavy metals in industrial applications: Cu, Pb, Zn, Sn, Ni, Co, Sb, Hg, Cd and Bi. Because arsenic has a toxicity similar to that of heavy metals and a density of 5.73 g/cm^3 , it is also included as a heavy metal when it occurs in the environment. According to the characteristics of the parent materials in the study area, we selected Pb, Zn, Cd, Ag, Cu, Ni, Co, Ti and V for our investigation and discussion.

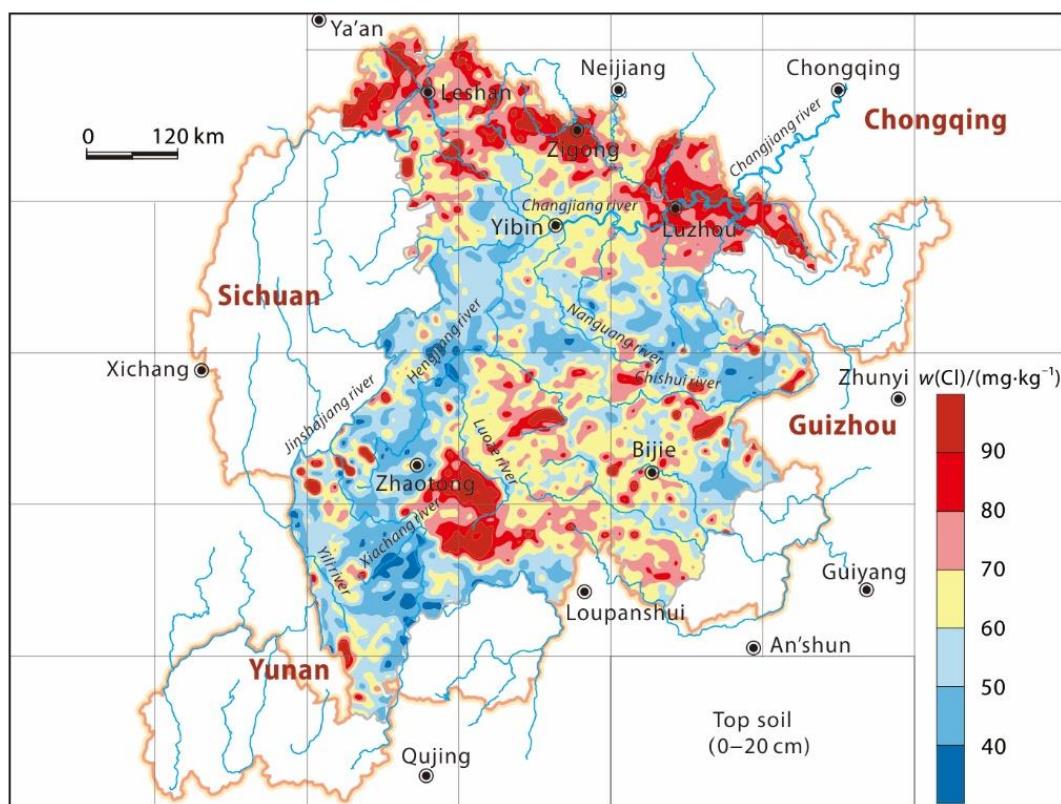


Fig. 16. Chlorine distribution pattern in the top (0–20 cm) soil of the Zhaotong – Bijie – Yibin – Luzhou – Leshan area

Рис. 16. Схема распределения Cl в верхних (0–20 см) почвах в районе Чжаотун – Бицзе – Ибинь – Лучжоу – Лэшань

Lead, Zn, Cd and Ag. The study area is rich in Pb, Zn and Ag resources. Currently, more than 400 Pb-Zn deposits have been discovered, including 5 large and 14 medium-size deposits. There are 14 silver deposits (including one large and three medium-size deposits). Lead, Zn and Ag deposits are mainly distributed in the Yiliang – Hezhang, Huize – Weining and Butuo – Qiaojia mine-cluster areas. Presently, there are more than 120 Pb, Zn and Ag mines, among which 42 are in operation and the rest suspended or closed.

The distributions of Pb, Zn, Ag and Cd showed that the concentration centers of Pb (Fig. 20), Zn (Fig. 21), Ag (Fig. 22) and Cd (Fig. 23) in both top and deep soils were strictly controlled by the distributions of Pb, Zn and Ag deposits in the Pb-Zn-Ag mine clusters. Comparison of Pb, Zn, Ag and Cd levels in both soils revealed clear cumulative distribution patterns for all elements regardless of their absolute contents. Additionally, regional Pb, Zn, Ag and Cd peaks occurred in the top soils of the Weining – Hezhang area in Guizhou Province.

Our analyses showed that the cumulation patterns of Pb, Zn, Ag and Cd in the top soils changed with elevation. Lead, Zn and Cd contents peaked at the same elevation as the Pb, Zn and Ag deposits (Fig. 24, a–c), with decreasing Ag content as elevation declines (Fig. 24, d). Compared to deep soil, concentrations of Pb, Zn, Ag and Cd in the top soil were higher by 29.8 %, 6.8 %, 18.9 % and 169 %, respectively. The difference was more than three orders of magnitude. For Cd, its contents in the top soil were 142 %, 235 % and 102 % higher than in the deep soil at elevations below 1,800 m, 1,800–2,700 m and above 2,700 m, respectively. For Zn, meanwhile, 2,400 m was the point of division: at below 2,400 m, the Zn content in the top soil was 6–18 % higher than in the deep soil, and the difference grew as elevation decreases. At above 2,400 m, the differences were further reduced and even became negative at above 2,800 m. The changes in Pb and Ag concentrations in the top soil, however, were significantly different from those for Zn and Cd. As elevation decreases, Pb and Ag contents in the top soil became increasingly similar to that in the deep soil.

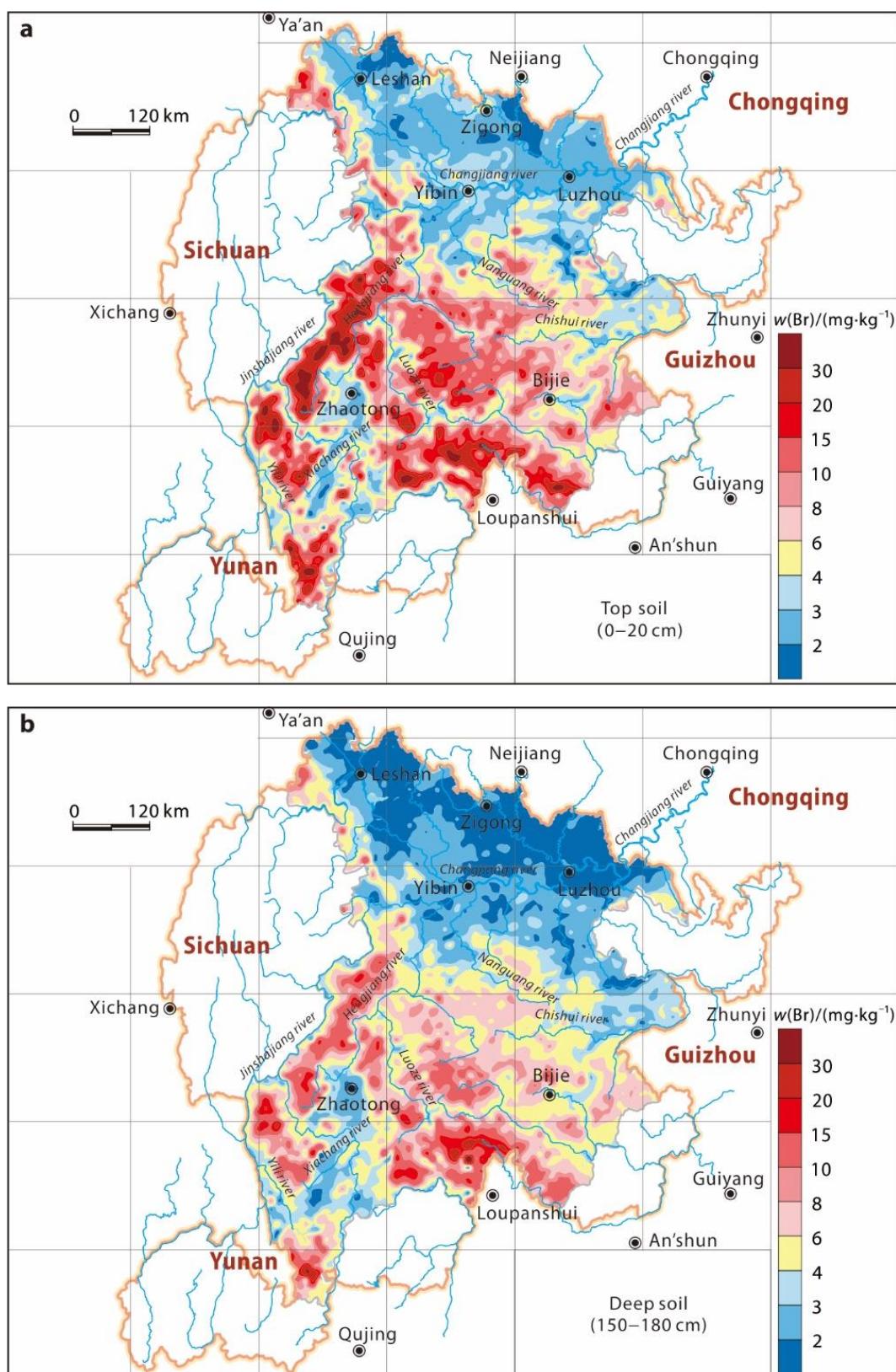


Fig. 17. Bromine distribution pattern in the top (0–20 cm) (a) and deep (150–180 cm) (b) soils of the Zhaotong – Bijie – Yibin – Luzhou – Leshan area

Рис. 17. Схема распределения Br в верхних (0–20 см) (а) и глубоких (150–180 см) (б) почвах в районе Чжаотун – Бицзе – Ибинь – Лучжоу – Лэшань

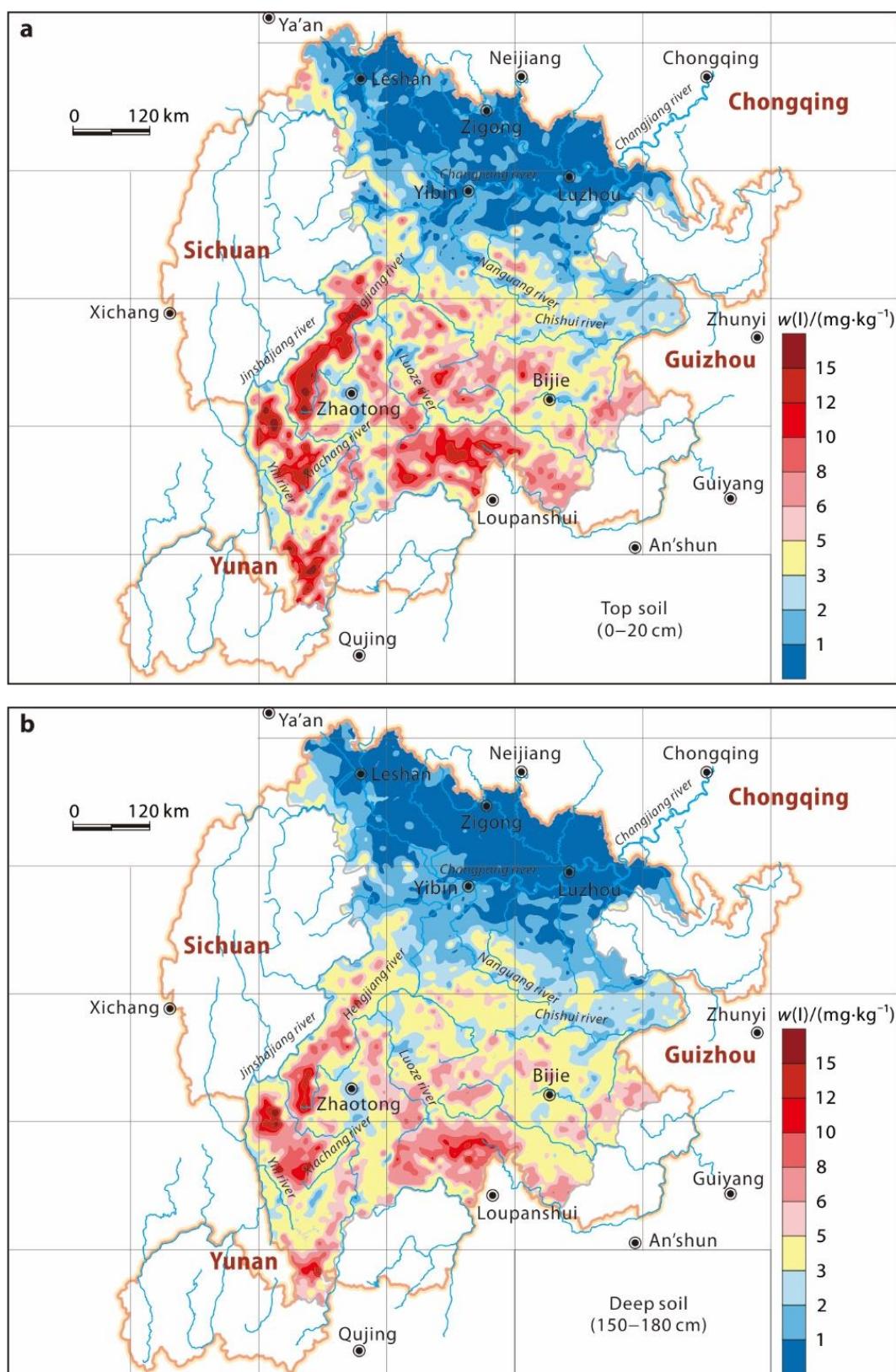


Fig. 18. Iodine distribution pattern in the top (0–20 cm) (a) and deep (150–180 cm) (b) soils of the Zhaotong – Bijie – Yibin – Luzhou – Leshan area

Рис. 18. Схема распределения І в верхних (0–20 см) (а) и глубоких (150–180 см) (б) почвах в районе Чжаотун – Бицзе – Ибинь – Лучжоу – Лэшань

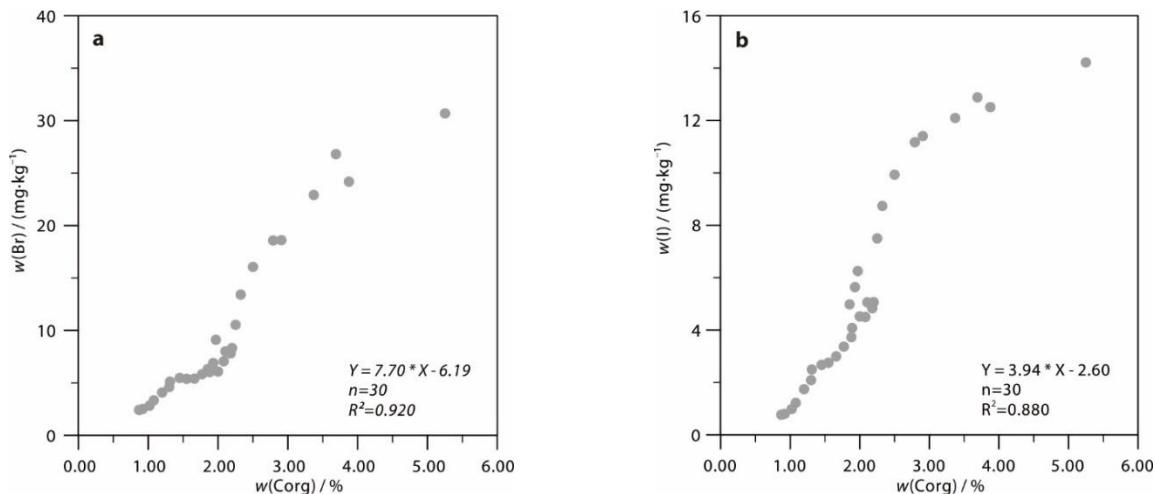


Fig. 19. Correlation between C_{org} and Br (a) or I (b) in the top soil of the Zhaotong – Bijie – Yibin – Quzhou – Leshan area

Рис. 19. Корреляция между C_{org} и Br (a) или I (b) в верхних почвах в районе Чжаотун – Бицзе – Ибинь – Лучжоу – Лэшань

In certain geographical areas, the epigenetic geochemical behavior of elements are mainly depended on their geochemical properties and organic matters, pH and clay minerals in the top soil. A partial analysis of correlations between Pd, Zn, Ag or Cd levels in soils and organic matter or pH indicated that, the main driver of the geochemical behavior of Ag and Pb in an epigenetic environment is organic carbon, while that for Zn and Cd is pH (Table 3). Because Ag can be strongly adsorbed and fixed by organic matter in epigenetic environments, while Zn has relatively high solubility in acidic environments, Ag enrichment (Figs. 22, a and 24, d) and Zn depletion (Figs. 21, a and 24, b) were noted in the top soils of alpine meadows and forests.

The magnitude of increasing Pb and Cd contents in the top and deep soils at the elevation of the deposits was significantly larger than that in other areas (Fig. 24, a,c). Also, we observed Cd, Pb, Zn and Ag pollution in some regions. It suggests extreme levels of human disturbance, including mining and metal extraction, at the elevation of the deposits. A detailed literature review suggested that the Hezhang – Weining region was once (over 300 years ago) a center for indigenous zinc smelting activities, in addition to the large-, medium-, and small-size Pb and Zn mines such as Tianqiao (Zhugongtang), Wuliping, Shaojiwan, Yadu and Zhushachang mines that are currently in operation or closed. The slag formed during mining has been spread throughout the region [19, 20] and is the main source of

Cd, Pb, Zn and Ag pollution (Fig. 25). In a survey of Cd contents in corn in the above-mentioned areas found that 12.1 % of the investigated corn had Pb and Cd contents higher than the allowable amounts [21]. Such finding is rare in corn-growing areas nationwide.

Copper, Ni, Co, Ti and V. The Emeishan LIP is generally considered to be the product of a mantle-plume event [22, 23] and characterized by high Cu, Ni, Co, Cr, Ti and V contents. In the southwestern part of the study region, areas with high Cu, Ni, Co, Cr, Ti and V contents in the top and deep soils overlap with the Emeishan basalt area, and the same holds true for the carbonate area in the southeastern part of the study region. This indicates that the spatial distributions of Cu, Ni, Co, Cr, Ti and V are mainly controlled by the Emeishan basalt and carbonate rock parent materials (Figs. 26–31). We showed in a statistical analysis that the average relative change rates of Cu, Ni, Co, Cr, Ti and V contents in the top soil, with respect to that in the deep soil (defined as (content in the top soil – content in the deep soil) / content in the deep soil) × 100) were -5.9 %, -5.31 %, -6.09 %, -6.52 %, -4.8 % and -2.58 %, respectively, demonstrating that the concentrations of these elements were all slightly lower in the top soil. In a correlation analysis comparing elevation with elemental content, we showed that the rates of Co and Ni loss in the top soil increased with increasing elevation (Fig. 32, a,b). The average rates of change of Cu, Cr, Ti and V contents in the top soil at different

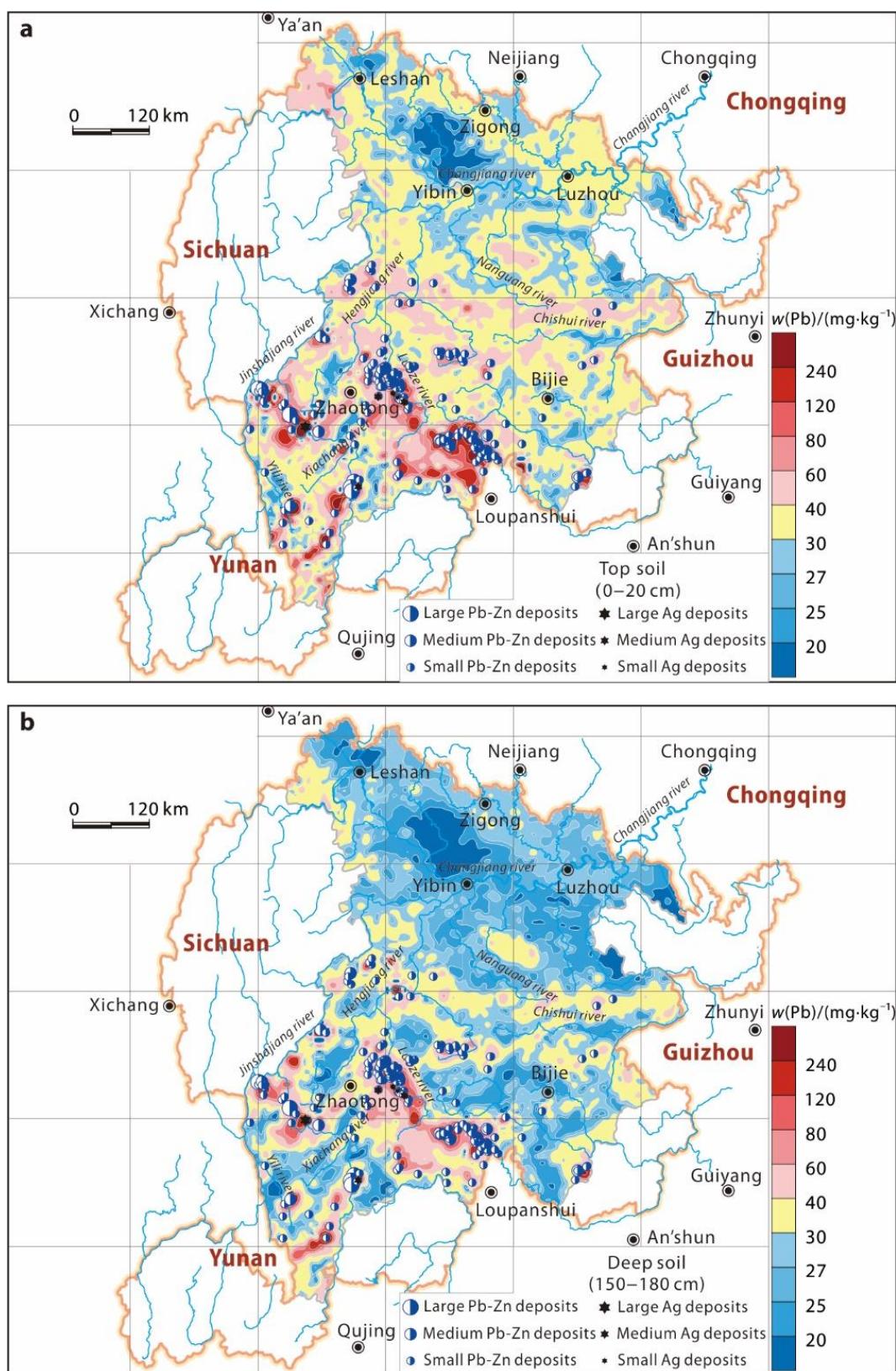


Fig. 20. Lead distribution pattern in the top (0–20 cm) (a) and deep (150–180 cm) (b) soils of the Zhaotong – Bijie – Yibin – Luzhou – Leshan area

Рис. 20. Схема распределения Pb в верхних (0–20 см) (а) и глубоких (150–180 см) (б) почвах в районе Чжаотун – Бицзе – Ибинь – Лучжоу – Лэшань

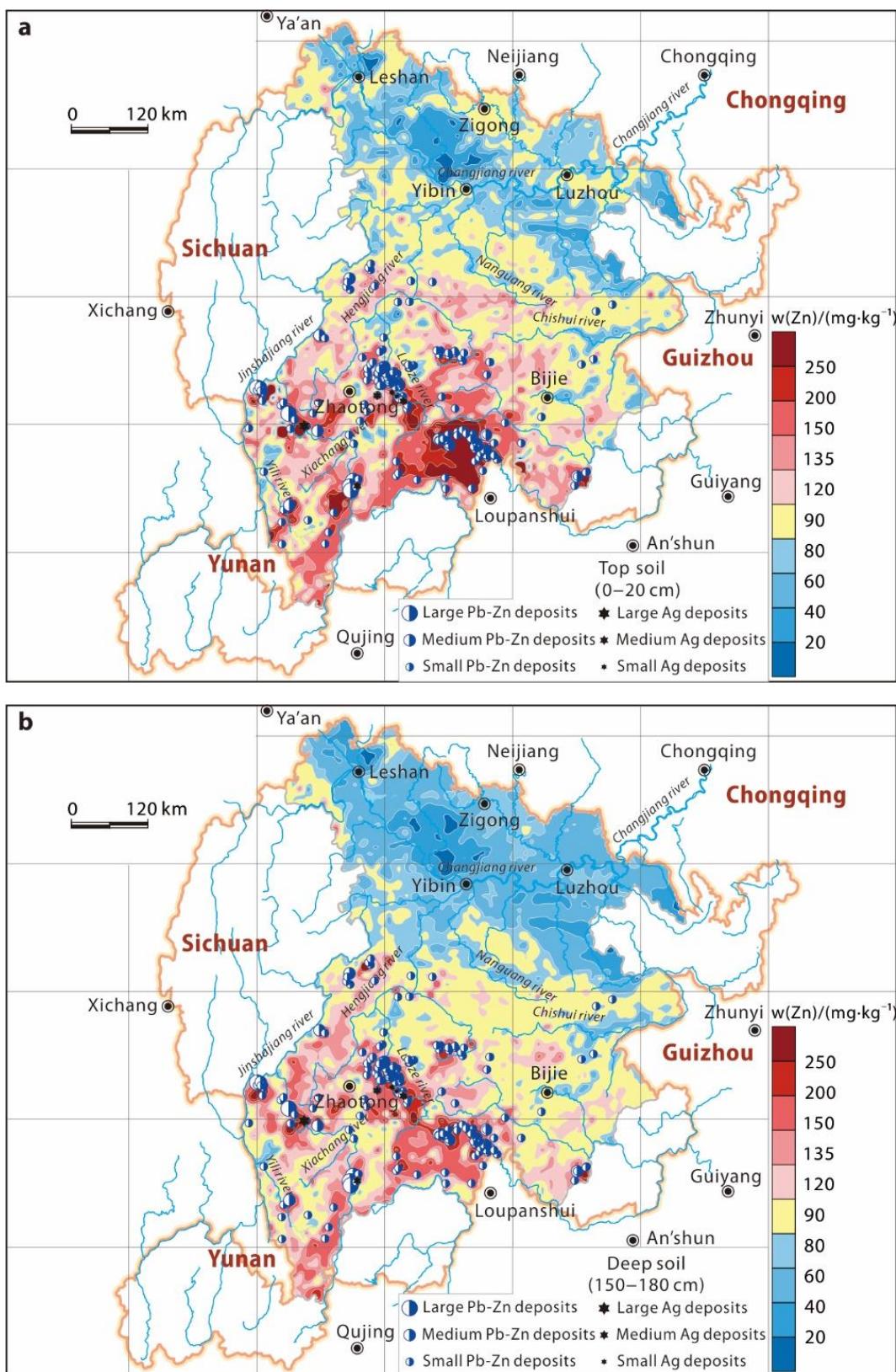


Fig. 21. Zinc distribution pattern in the top (0–20 cm) (a) and deep (150–180 cm) (b) soils of the Zhaotong – Bijie – Yibin – Luzhou – Leshan area

Рис. 21. Схема распределения Zn в верхних (0–20 см) (а) и глубоких (150–180 см) (б) почвах в районе Чжаотун – Бицзе – Ибинь – Лучжоу – Лэшань

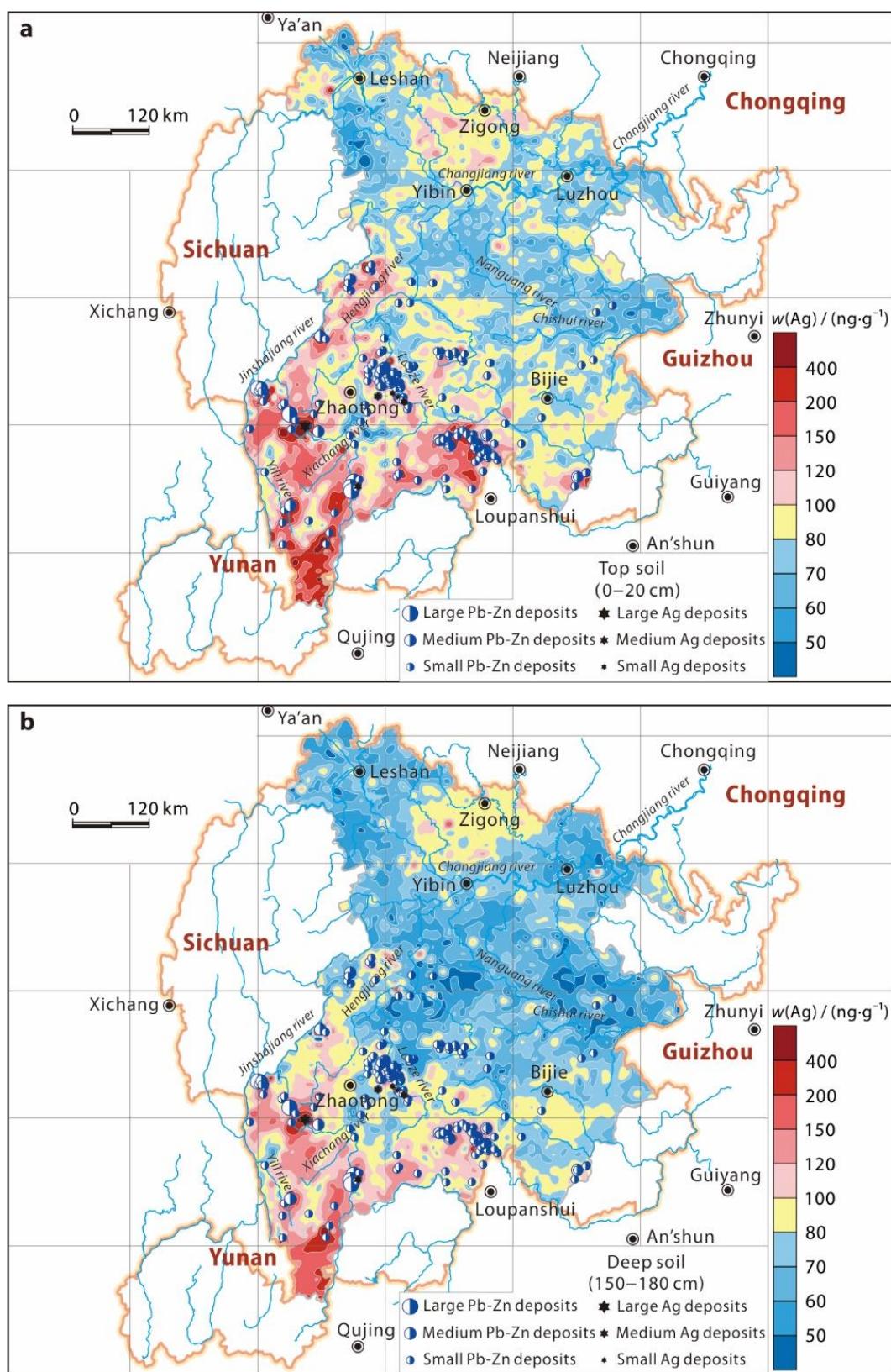


Fig. 22. Silver distribution pattern in the top (0–20 cm) (a) and deep (150–180 cm) (b) soils of the Zhaotong – Bijie – Yibin – Luzhou – Leshan area

Рис. 22. Схема распределения Ag в верхних (0–20 см) (а) и глубоких (150–180 см) (б) почвах в районе Чжаотун – Бицзе – Ибинь – Лучжоу – Лэшань

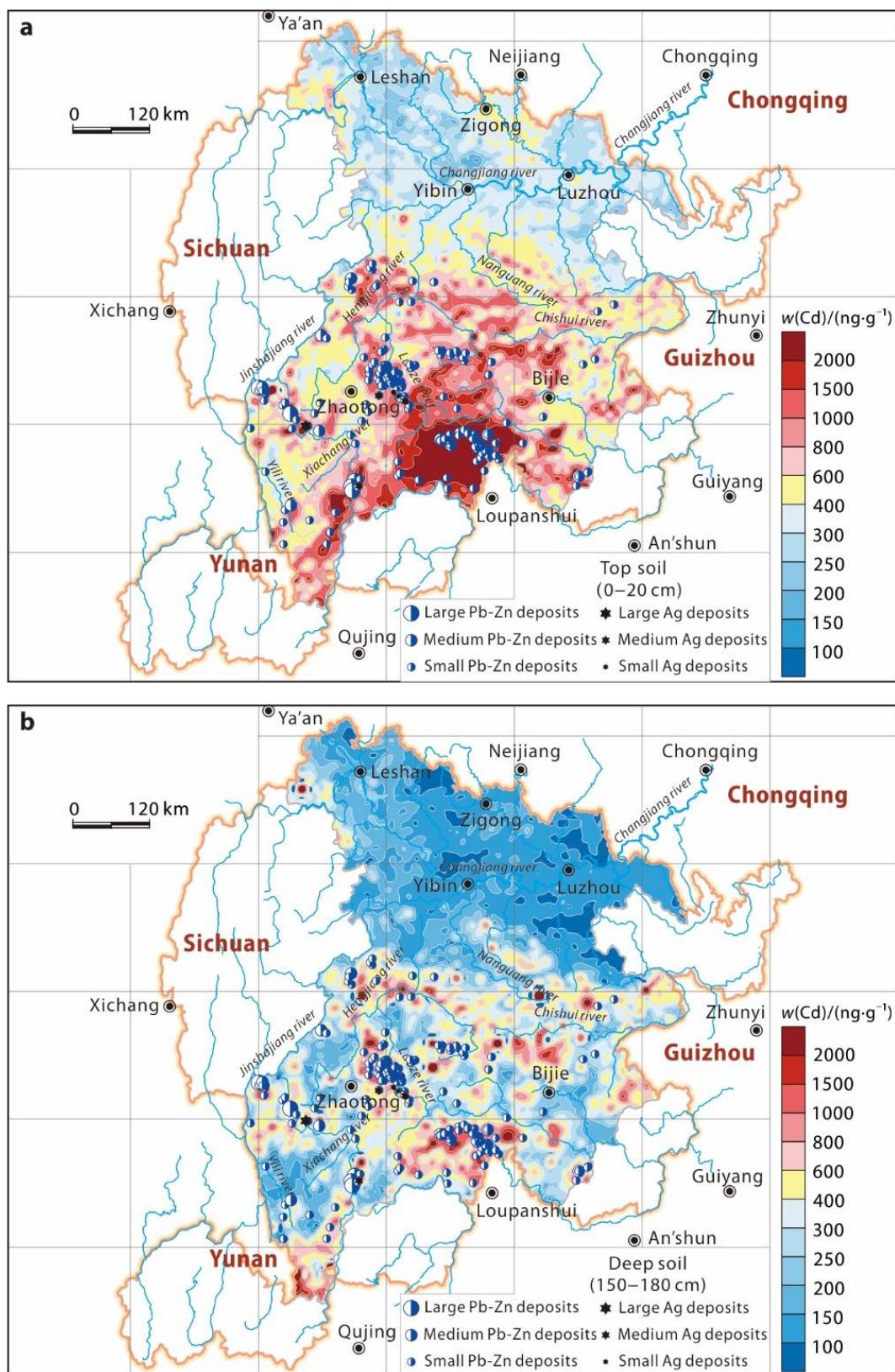


Fig. 23. Cadmium distribution pattern in the top (0–20 cm) (a) and deep (150–180 cm) (b) soil of the Zhaotong – Bijie – Yibin – Luzhou – Leshan area

Рис. 23. Схема распределения Cd в верхних (0–20 см) (а) и глубоких (150–180 см) (б) почвах в районе Чжаотун – Бицзе – Ибинь – Лучжоу – Лэшань



elevations were relatively consistent (Fig. 32, c–f), indicating the change of top soil contents of

these five elements is essentially controlled by the same factors throughout the region.

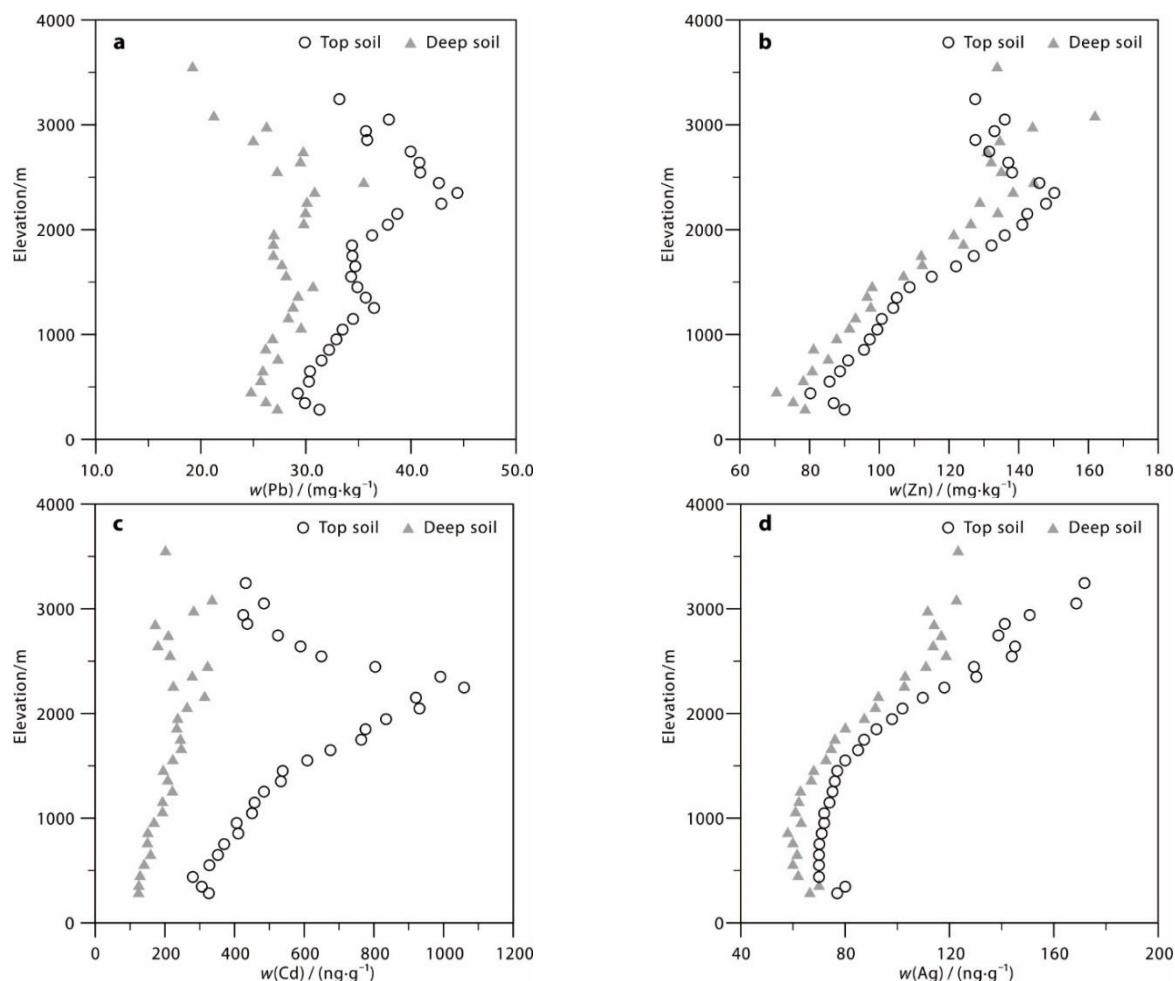


Fig. 24. Plot of Pb (a), Zn (b), Cd (c) and Ag (d) contents in the top and deep soils vs. elevation in the Zhaotong – Bijie – Yibin – Luzhou – Leshan area

Рис. 24. График содержания Pb (а), Zn (б), Cd (в) и Ag (д) в верхних и глубоких почвах в зависимости от глубины в районе Чжаотун – Бицзе – Ибинь – Лучжоу – Лэшань

Table 3. Partial correlation analysis of Pb, Zn, Ag and Cd with respect to C_{org} and pH in soils of the Zhaotong – Bijie – Yibin – Leshan – Luzhou area

Таблица 3. Частичный корреляционный анализ содержаний Pb, Zn, Ag и Cd в соответствии с содержанием C_{org} и pH в почвах района Чжаотун – Бицзе – Ибинь – Лучжоу – Лэшань

Element	Test parameters	pH (constant C_{org})	C_{org} (constant pH)
Ag	Correlation	0.055	0.817
	Significance (two-tailed)	0.784	0
	df	25	25
Cd	Correlation	-0.593	-0.323
	Significance (two-tailed)	0.001	0.101
	df	25	25
Pb	Correlation	-0.08	0.655
	Significance (two-tailed)	0.692	0
	df	25	25
Zn	Correlation	-0.583	-0.257
	Significance (two-tailed)	0.001	0.195
	df	25	25

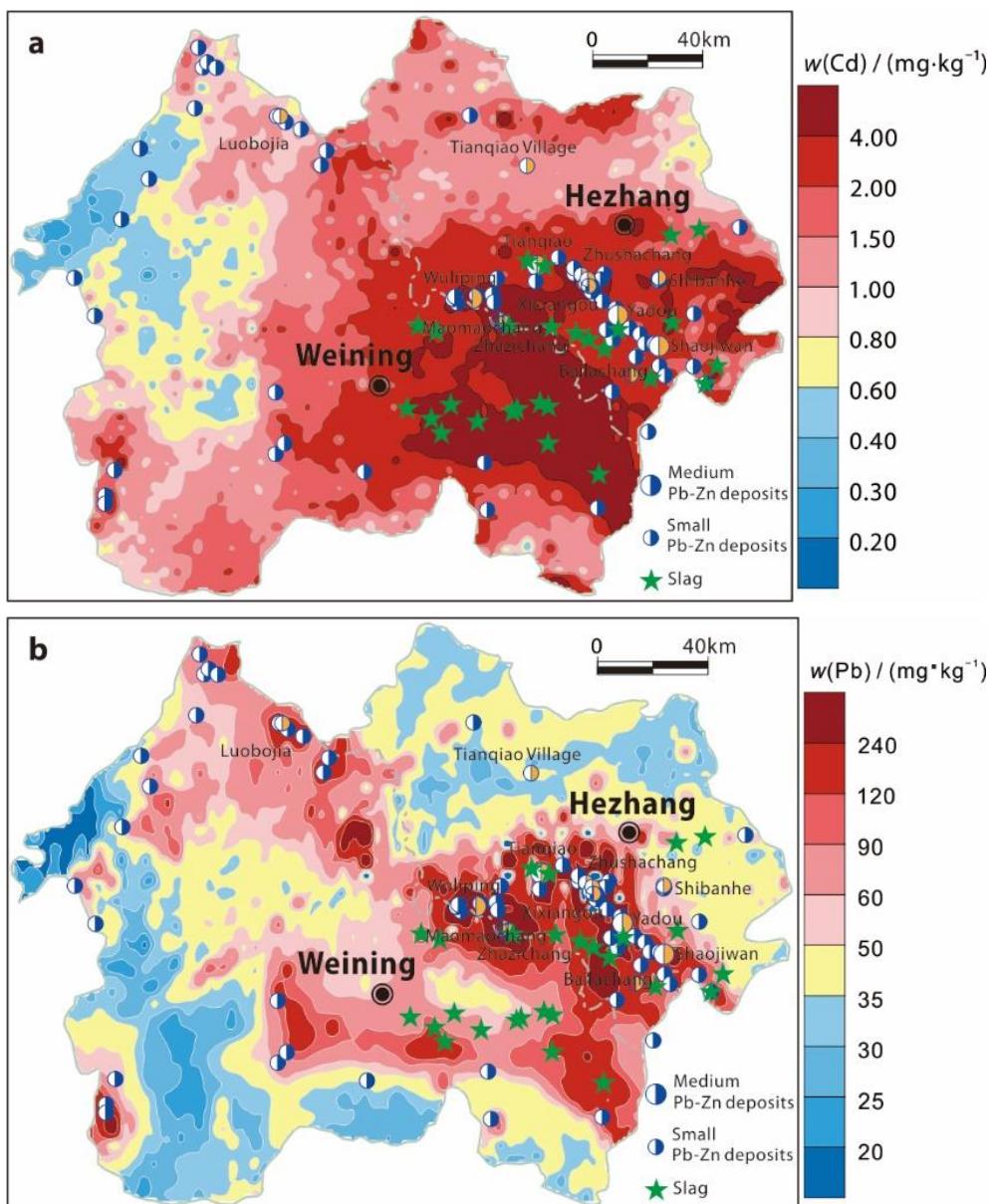


Fig. 25. Geochemical map of the Weining – Hezhang area, showing the locations of Zn smelting slag (adapted from [19]) and Cd (a) and Pb (b) contents in the top soils

Рис. 25. Геохимическая карта района Вейнинг – Хечжан с указанием местонахождения цинкового шлака (по данным источника [19]), Cd (а) и Pb (б), содержащихся в верхних почвах

The analysis of driving factors of elemental content (Table 4) demonstrated that, the partial correlation coefficients of Cu, Ni, Co, Cr, Ti and V with respect to pH, were greater than those to organic carbon. This suggests that the loss of these elements in epigenetic environments is mainly driven by pH.

Conclusions and implications

Our study on driving mechanisms of the macroscopic distribution of elements in the top and deep soils of the Zhaotong – Bijie – Yibin – Luzhou – Leshan region clearly showed the

following: the geological environment determines the natural concentrations of chemical elements in soil; epigenetic geochemical processes reshape the microscopic distribution of elements in the top soil; biogeochemical processes drive the evolution of land quality; intensive human activities (such as mining) have disruptive impact on the natural evolution of elemental distribution. A better understanding of the dynamic geochemical processes on the Earth's surface can help to develop a theoretical framework, within which we can study the regional ecology formed through the interactions of topography, hydrology

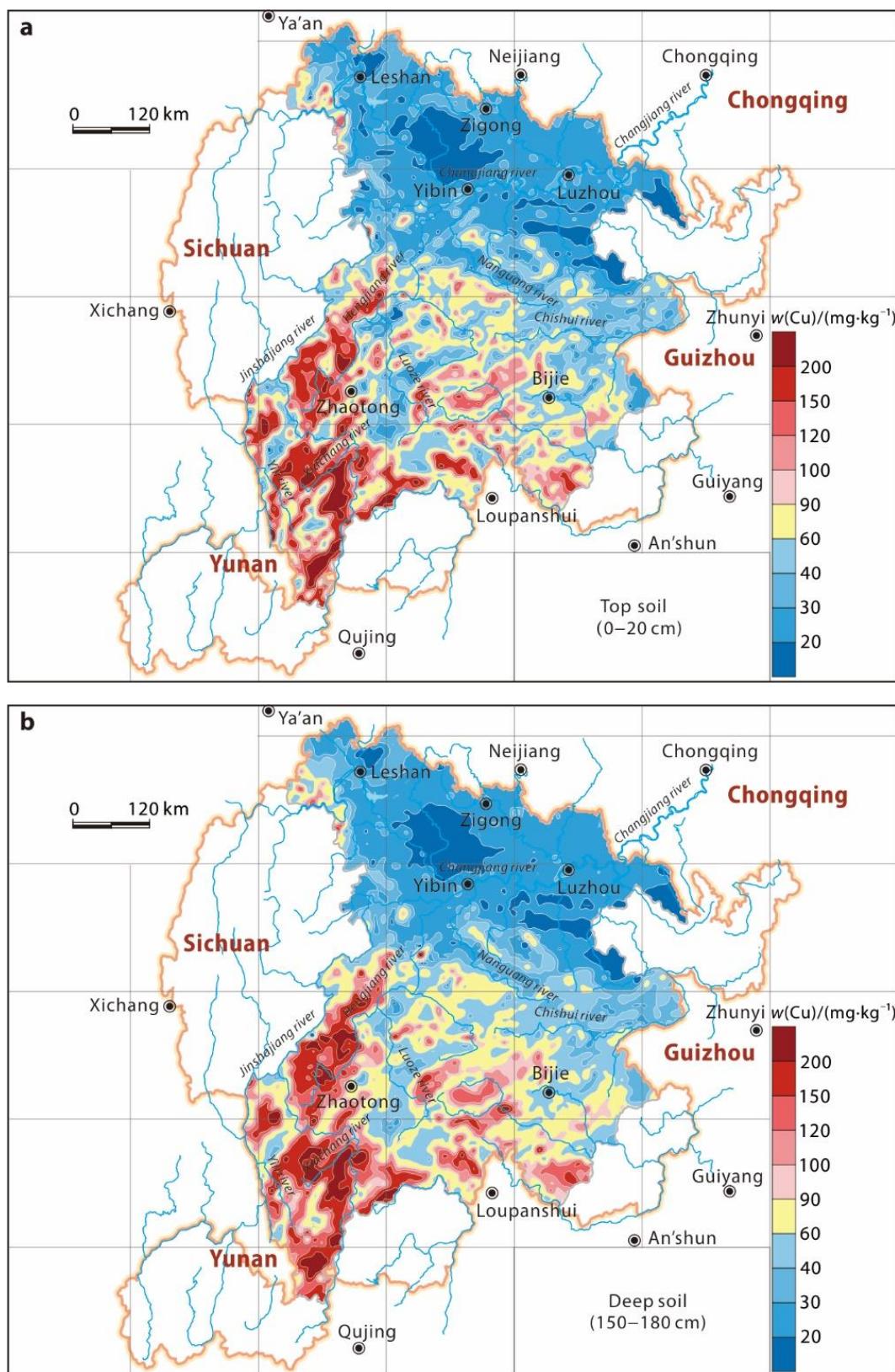


Fig. 26. Copper distribution pattern in the top (0–20 cm) (a) and deep (150–180 cm) (b) soils of the Zhaotong – Bijie – Yibin – Luzhou – Leshan area

Рис. 26. Схема распределения Cu в верхних (0–20 см) (а) и глубоких (150–180 см) (б) почвах в районе Чжаотун – Бицзе – Ибинь – Лучжоу – Лэшань

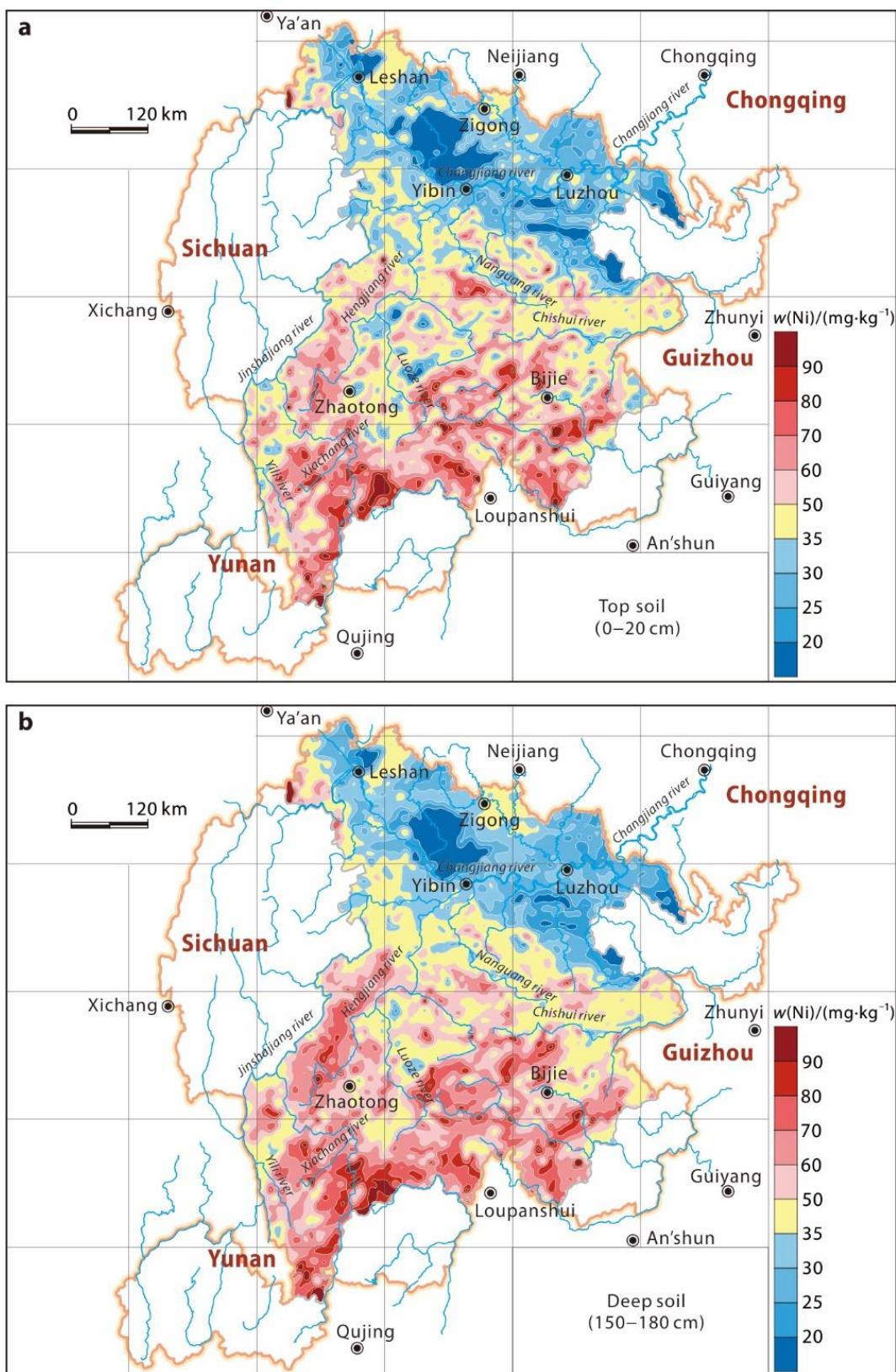


Fig. 27. Nickel distribution pattern in the top (0–20 cm) (a) and deep (150–180 cm) (b) soils of the Zhaotong – Bijie – Yibin – Luzhou – Leshan area

Рис. 27. Схема распределения Ni в верхних (0–20 см) (а) и глубоких (150–180 см) (б) почвах в районе Чжаотун – Бицзе – Ибинь – Лучжоу – Лэшань

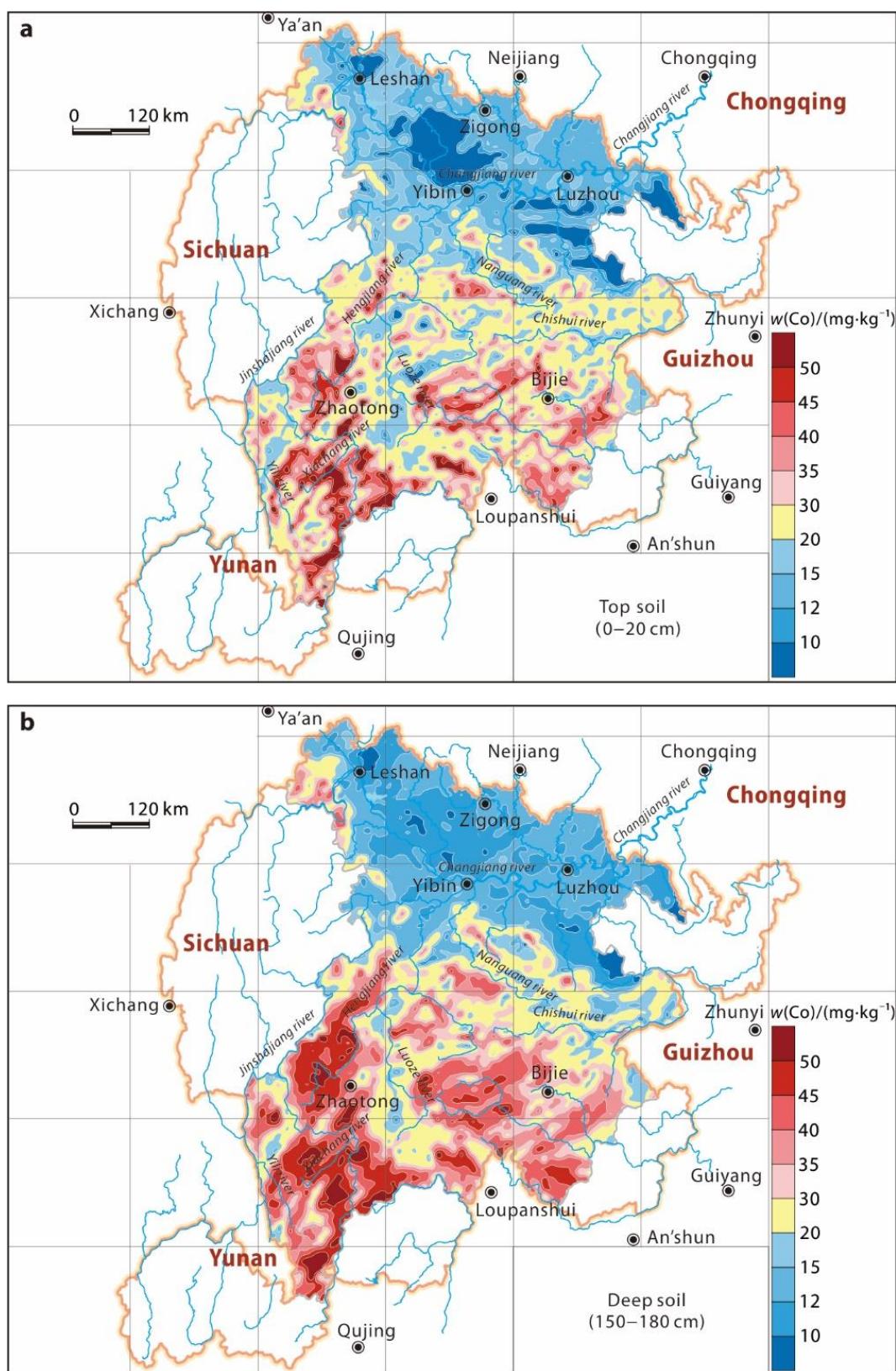


Fig. 28. Cobalt distribution pattern in the top (0–20 cm) (a) and deep (150–180 cm) (b) soils of the Zhaotong – Bijie – Yibin – Luzhou – Leshan area

Рис. 28. Схема распределения Со в верхних (0–20 см) (а) и глубоких (150–180 см) (б) почвах в районе Чжаотун – Бицзе – Ибинь – Лучжоу – Лэшань

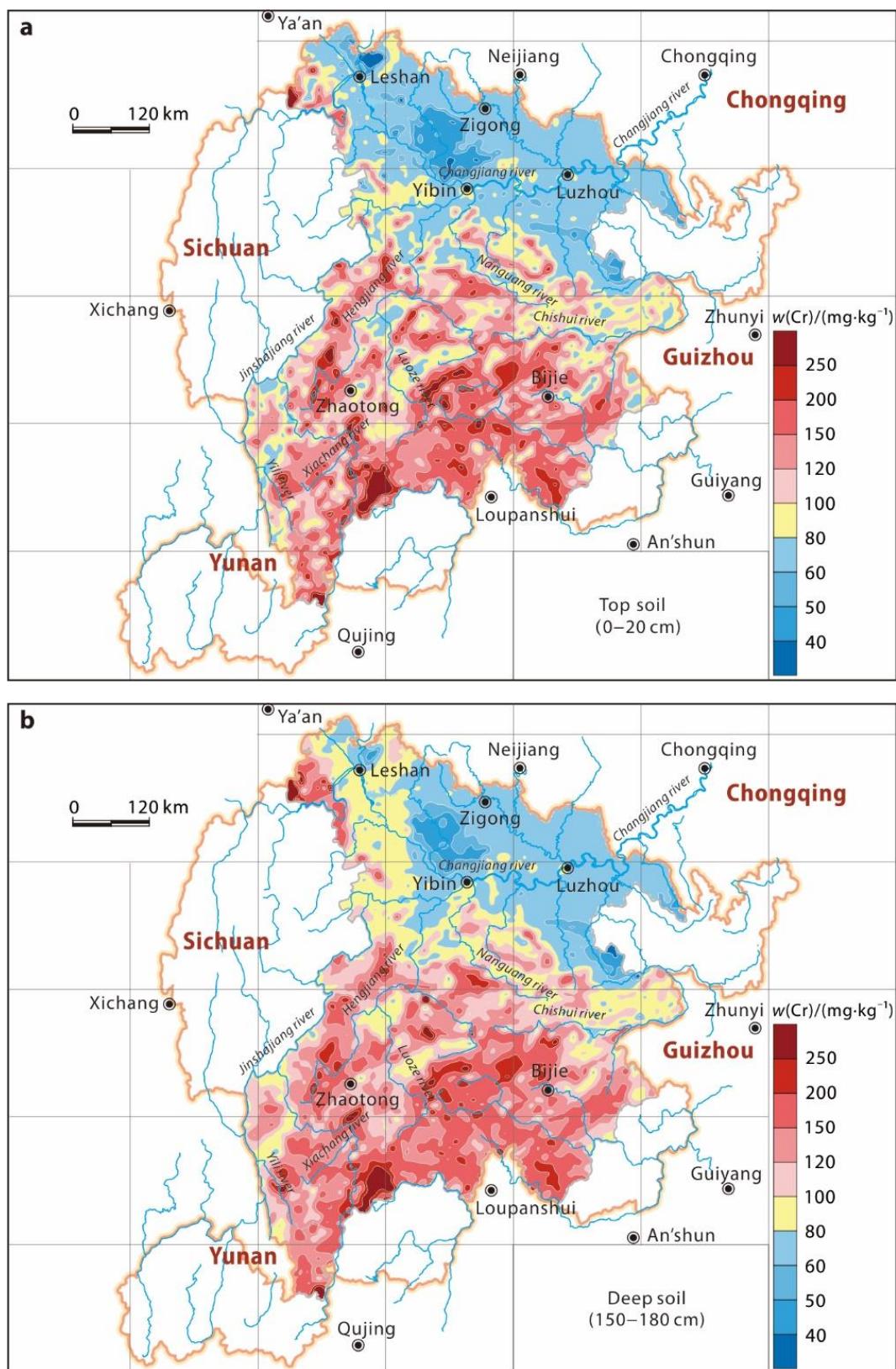


Fig. 29. Chromium distribution pattern in the top (0–20 cm) (a) and deep (150–180 cm) (b) soils of the Zhaotong – Bijie – Yibin – Luzhou – Leshan area

Рис. 29. Схема распределения Cr в верхних (0–20 см) (а) и глубоких (150–180 см) (б) почвах в районе Чжаотун – Бицзе – Ибинь – Лучжоу – Лэшань

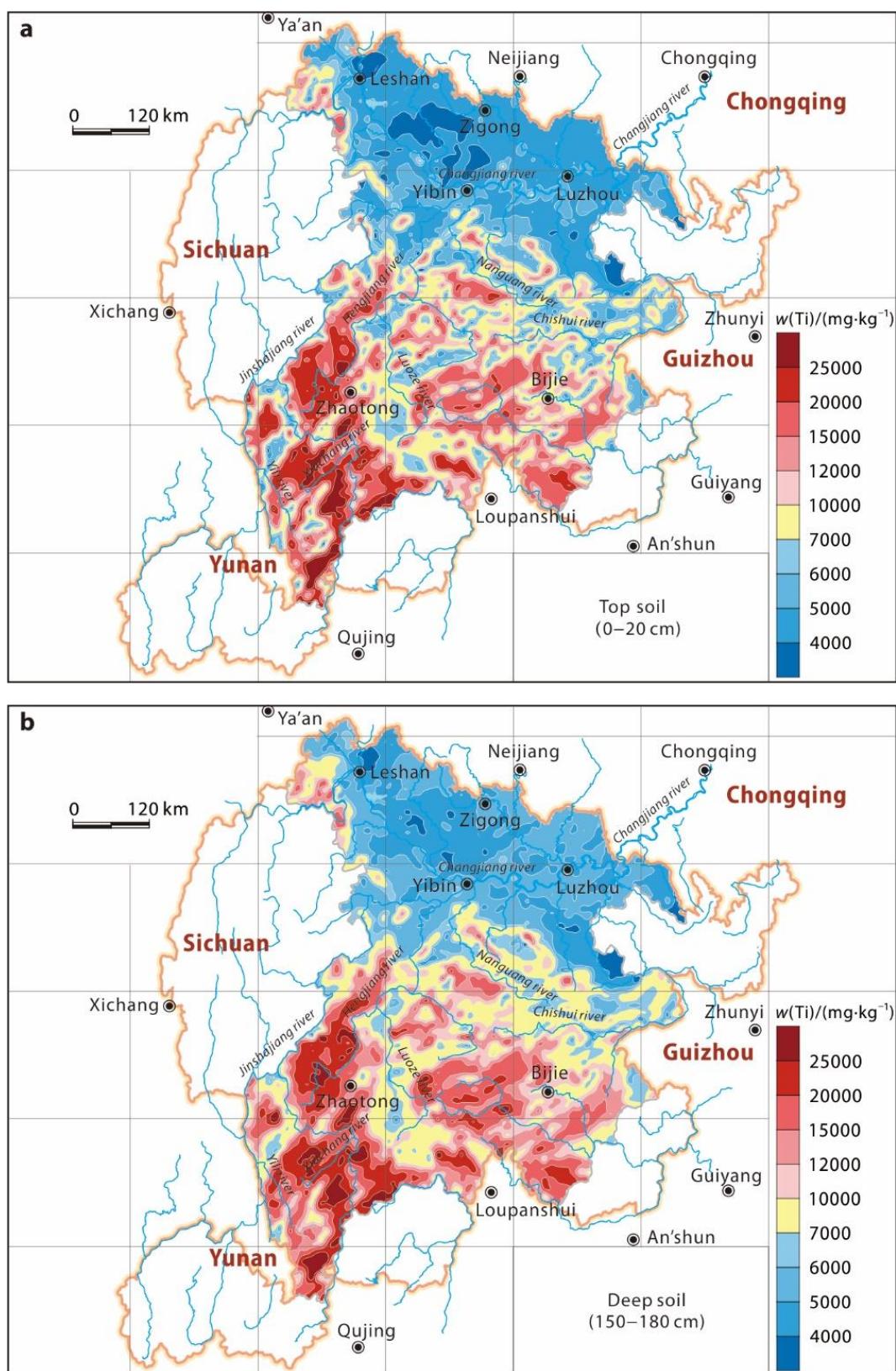


Fig. 30. Titanium distribution pattern in the top (0–20 cm) (a) and deep (150–180 cm) (b) soils of the Zhaotong – Bijie – Yibin – Luzhou – Leshan area

Рис. 30. Схема распределения Ti в верхних (0–20 см) (а) и глубоких (150–180 см) (б) почвах в районе Чжаотун – Бицзе – Ибинь – Лучжоу – Лэшань

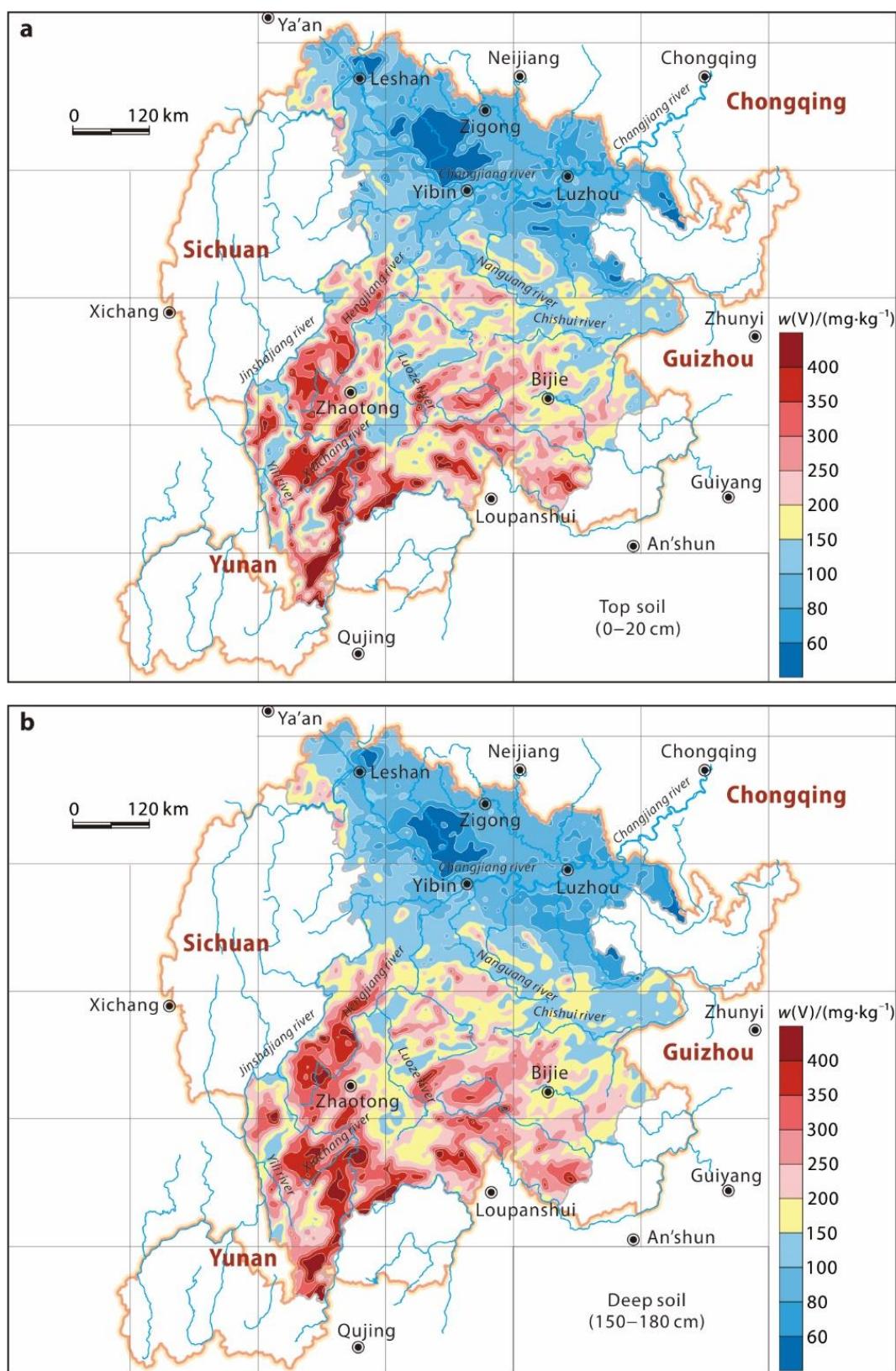


Fig. 31. Vanadium distribution pattern in the top (0–20 cm) (a) and deep (150–180 cm) (b) soils of the Zhaotong – Bijie – Yibin – Luzhou – Leshan area

Рис. 31. Схема распределения V в верхних (0–20 см) (а) и глубоких (150–180 см) (б) почвах в районе Чжаотун – Бицзе – Ибинь – Лучжоу – Лэшань

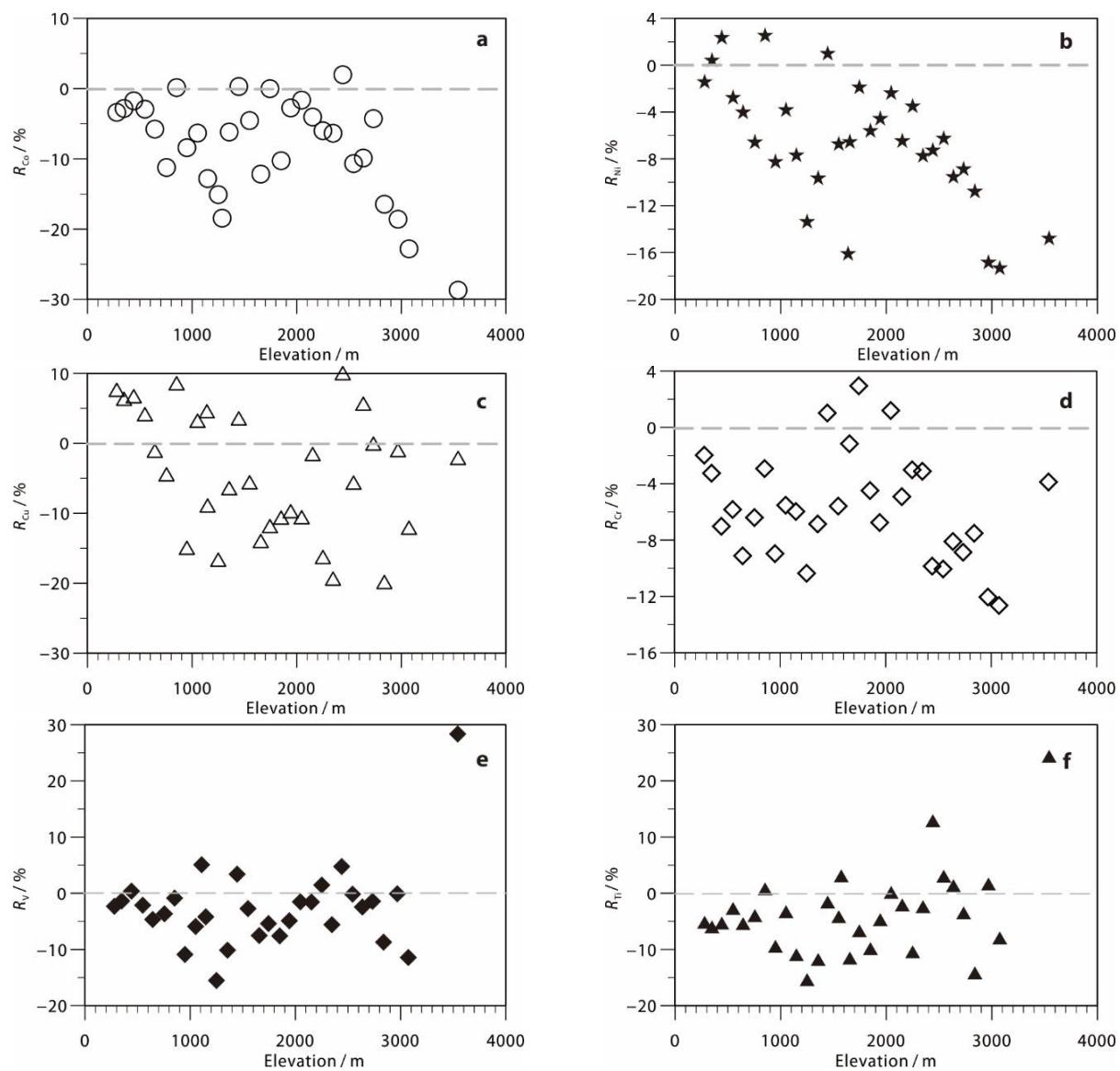


Fig. 32. Relative change rate (R_i) of Co (a), Ni (b), Cu (c), Cr (d), V (e) and Ti (f) contents in the top soil compared to that in the deep soil at different elevations in the Zhaotong – Bijie – Yibin – Luzhou – Leshan area

$$R_i = ((\text{content in the top soil} - \text{content in the deep soil}) / \text{content in the deep soil}) \times 100$$

Рис. 32. Относительная скорость изменения (R_i) содержания Со (а), Ni (б), Cu (с), Cr (д), V (е) и Ti (ф) в верхних почвах по сравнению с глубокими почвами на разных высотах в районе Чжаотун – Бицзе – Ибинь – Лучжоу – Лэшань

$$R_i = ((\text{содержание элемента в верхних почвах} - \text{содержание элемента в глубоких почвах}) / \text{содержание элемента в глубоких почвах}) \times 100$$

and land cover. Such framework has the potential for comprehensively integrating different scientific theories of Earth's systems. To study the physical, chemical and biodynamic processes on the Earth's surface, a new comprehensive survey and monitoring system for mountains, water bodies, forests, farmlands and grasslands is required. This system could help us determine the current natural resource usage, land quality, ecological quality and natural evolution patterns, and

assess land quality and future trends, so as to provide guidance for spatial planning and management nationwide.

China is a vast country with complex and diverse geographical landscapes [24]. In this study, we only analyzed the southwestern area characterized by mountains and gorges, and primarily revealed the mechanisms driving the macroscopic distribution of elements in the regional soils. Similar studies should be conducted in



Table 4. Results of partial correlation analysis of Cu, Ni, Co, Ti and V with respect to pH and C_{org} in soil in the Zhaotong – Bijie – Yibin – Luzhou – Leshan area
Таблица 4. Результаты частичного корреляционного анализа Cu, Ni, Co, Ti и V по отношению к pH и C_{org} в почвах в районе Чжаотун – Бицзе – Ибинь – Лучжоу – Лэшань

Element	Test parameter	pH (constant C _{org})	C _{org} (constant pH)
Cu	Correlation	-0.841	0.407
	Significance (two-tailed)	0	0.035
	df	25	25
Ni	Correlation	-0.588	-0.337
	Significance (two-tailed)	0.001	0.086
	df	25	25
Co	Correlation	-0.741	-0.504
	Significance (two-tailed)	0	0.007
	df	25	25
Cr	Correlation	-0.58	-0.303
	Significance (two-tailed)	0.002	0.124
	df	25	25
Ti	Correlation	-0.847	0.403
	Significance (two-tailed)	0	0.037
	df	25	25
V	Correlation	-0.769	0.272
	Significance (two-tailed)	0	0.169
	df	25	25

future to analyze a variety of landscapes, including forests and swampy landscapes, humid and semi-humid low mountains, semi-arid hilly landscapes, alpine lakes in hilly landscapes, arid and semi-arid or humid and semi-humid alpine mountains, arid Gobi relict mountains, karst areas, alluvial plains, and colluvial deposits in the Gobi desert. Such studies would represent considerable advances in epigenetic geochemical dynamics and help us to establish a solid foundation for the development of scientific theories of the Earth's systems [25, 26].

Currently, surveys on the quantity, quality and ecological status of various natural resources in China are disconnected rather than combined in a single system. Presently, the Ministry of Natural Resources is responsible for all natural resource assets. It formulates land use regulations and

conducts ecological protection and restoration. However, a comprehensive survey and monitoring system, integrating the quantity, quality and ecological conditions of all natural resources based on their various transport patterns, remains to be developed. Moreover, chemical elements are the basic components of natural resources. For example, our findings on the epigenetic geochemical dynamic processes and mutual interactions of resources components, in the southwestern mountain and gorge regions, suggest that changes in chemical elemental contents in the environment are extremely sensitive indicators of environmental changes. Hence, we recommend that the chemical compositions of natural resources should also be included in the procedures during the development of future survey and monitoring systems.

References

1. Hou Z. Support unified management and system restoration of natural resources based on earth system science. *China Natural Resources News*. 12.06.2018.
2. Li K, Peng M, Zhao C, et al. Twenty years of geochemical survey of national land quality. *Earth Science Frontiers*. 2019;26(5):1–37.
3. Yang X, Wang P, Gao D. Climate change characteristics of Wumengshan National Nature Reserve from 1971 to 2015. *Journal of Northeast Forestry University*. 2019;47(9):71–75.
4. Ji Z, Huang Z, Xie G. Dry and wet climate changes in Yunnan from 1961 to 2010. *Meteorological Science and Technology*. 2013;41(6):1073–1079.
5. Xiao K, Xing S, Ding J, et al. Division of key mineralization zones of important solid minerals and characteristics of resource potential in China. *Acta Geologica Sinica*. 2016;90(7):1269–1280.



6. He L, Wu D, Zhao F, et al. Geological characteristics and ore prospecting model and ore prospecting direction of Hezhang Zhugongtang ultra-large lead-zinc deposit. *Guizhou Geology*. 2019;36(2):106–109.
7. Xu Y, Zhong Y, Wei X, Chen J, Liu H, Xie W, et al. Evolution of Permian mantle plumes and surface systems. *Bulletin of Mineralogy, Petrology and Geochemistry*. 2017;36(3):359–373.
8. Lin J. Spatiotemporal distribution and geological characteristics of the Permian basalt in the three provinces of Southwest China. *Chinese Science Bulletin*. 1985;30(12):929–932.
9. Ye J, Yao L. Discussions on the quality control method of regional geochemical survey sample analysis. *Rock and Mineral Analysis*. 2004;23(2):137–142.
10. Wang S, Ji H, Ouyang Z, et al. Preliminary study on the weathering of carbonate rocks. *Science in China. Series D*. 1999;29(5):441–449.
11. Zhu L, Li J. *Weathering of carbonate rocks and its environmental effects*. Beijing: Geological Publishing House; 2004. 131 p.
12. Darnley AG, Björklund A, Bølviken B, Gustavsson N., Koval P.V., Plant J.A., et al. *A global geochemical database for environmental and resource management*. Paris: UNESCO Publishing; 1995. 122 p.
13. Cui Z, Zhang H, Chen X, Zhang C, Ma W, Huang C, et al. Pursuing sustainable productivity with millions of smallholder farmers. *Nature*. 2018;555(7696):363–366. <https://doi.org/10.1038/nature25785>
14. Hu Y, Li C, Wen H, et al. Characteristics of silver minerals in the lead-zinc-silver deposits at the junction of Sichuan, Yunnan, and Guizhou. *Bulletin of Mineralogy, Petrology and Geochemistry*. 2000;19(4):318–320.
15. Fuge R, Johnson C. The geochemistry of iodine: a review. *Environmental Geochemistry and Health*. 1986;8(2):31–54. <https://doi.org/10.1007/BF02311063>
16. Muramatsu Y, Yoshida S, Fehn U, Amachi S, Ohmomo Y. Studies with natural and anthropogenic iodine isotopes: iodine distribution and cycling in the global environment. *Journal of Environmental Radioactivity*. 2004;74(1-3):221–232. <https://doi.org/10.1016/J.JENVRAD.2004.01.011>
17. Yamaguchi N, Nakano M, Takamatsu R, Tanida H. Inorganic iodine incorporation into soil organic matter: evidence from iodine K-edge X-ray absorption near-edge structure. *Journal of Environmental Radioactivity*. 2010;101(6):451–457. <https://doi.org/10.1016/j.jenvrad.2008.06.003>
18. Fuge R. Soils and Iodine Deficiency. In: Selinus O (eds.). *Essentials of medical geology: impacts of the natural environment on public health*. Dordrecht: Springer Netherlands; 2013. p.417–432.
19. Peng Y. *Study on the distribution and migration of heavy metals in slag, soil and plants in the indigenous zinc smelting district of Northwest Guizhou*. Guiyang: Guizhou University; 2018.
20. Li Z, Feng X, Bi X, et al. Pollution status of heavy metals in soil on an indigenous zinc smelting site in Guizhou Province. *Chinese Journal of Ecology*. 2011;30(5):55–59.
21. Chen F, Dong Z, Wang C, et al. Pollution status and risk assessment of heavy metals in cultivated soil and crops in zinc smelting area. *Environmental Science*. 2017;38(10):376–385.
22. Li J, Zhong H, Zhu WG, Bai ZJ, Hu W. Elemental and Sr-Nd isotopic geochemistry of Permian Emeishan flood basalts in Zhaotong, Yunnan Province, SW China. *International Journal of Earth Science*. 2017;106(2):617–630. <https://doi.org/10.1007/s00531-016-1326-z>
23. Chung SL, Jahn BM. Plume-lithosphere interaction in generation of the Emeishan flood basalts at the Permian-Triassic boundary. *Geology*. 1995;23(10):889–892. [https://doi.org/10.1130/0091-7613\(1995\)023<0889:PLIIGO>2.3.CO;2](https://doi.org/10.1130/0091-7613(1995)023<0889:PLIIGO>2.3.CO;2)
24. Xie X, Ren T. National geochemical mapping and environmental geochemistry – progress in China. *Journal of Geochemical Exploration*. 1993;49(1-2):15–34. [https://doi.org/10.1016/0375-6742\(93\)90037-M](https://doi.org/10.1016/0375-6742(93)90037-M)
25. Lawton J. Earth system science. *Science*. 2001;292(5524):1965. <https://doi.org/10.1126/science.292.5524.1965>
26. Bockheim JG, Gennadiyev AN. Soil-factorial models and earth-system science: a review. *Geoderma*. 2010;159(3-4):243–251.

Библиографический список

1. Hou Z. Support unified management and system restoration of natural resources based on earth system science // China Natural Resources News. 12.06.2018.
2. Li K., Peng M., Zhao C., et al. Twenty years of geochemical survey of national land quality // Earth Science Frontiers. 2019. Vol. 26. Iss. 5. P. 1–37.
3. Yang X., Wang P., Gao D. Climate change characteristics of Wumengshan National Nature Reserve from 1971 to 2015 // Journal of Northeast Forestry University. 2019. Vol. 47. Iss. 9. P. 71–75.
4. Ji Z., Huang Z., Xie G. Dry and wet climate changes in Yunnan from 1961 to 2010 // Meteorological Science and Technology. 2013. Vol. 41. Iss. 6. P. 1073–1079.
5. Xiao K., Xing S., Ding J., et al. Division of key mineralization zones of important solid minerals and characteristics of resource potential in China // Acta Geologica Sinica. 2016. Vol. 90. Iss. 7. P. 1269–1280.
6. He L., Wu D., Zhao F., et al. Geological characteristics and ore prospecting model and ore prospecting direction of Hezhang Zhugongtang ultra-large lead-zinc deposit // Guizhou Geology. 2019. Vol. 36. Iss. 2. P. 106–109.
7. Xu Y., Zhong Y., Wei X., Chen J., Liu H., Xie W., et al. Evolution of Permian mantle plumes and surface systems // Bulletin of Mineralogy, Petrology and Geochemistry. 2017. Vol. 36. Iss. 3. P. 359–373.
8. Lin J. Spatiotemporal distribution and geological characteristics of the Permian basalt in the three provinces of Southwest China // Chinese Science Bulletin. 1985. Vol. 30. Iss. 12. P. 929–932.



9. Ye J., Yao L. Discussions on the quality control method of regional geochemical survey sample analysis. *Rock and Mineral Analysis*. 2004;23(2):137–142.
10. Wang S., Ji H., Ouyang Z., et al. Preliminary study on the weathering of carbonate rocks // *Science in China. Series D*. 1999. Vol. 29. Iss. 5. P. 441–449.
11. Zhu L., Li J. Weathering of carbonate rocks and its environmental effects. Beijing: Geological Publishing House, 2004. 131 p.
12. Darnley A.G., Björklund A., Bølviken B., Gustavsson N., Koval P.V., Plant J.A., et al. A global geochemical database for environmental and resource management. Paris: UNESCO Publishing, 1995. 122 p.
13. Cui Z., Zhang H., Chen X., Zhang C., Ma W., Huang C., et al. Pursuing sustainable productivity with millions of smallholder farmers // *Nature*. 2018. Vol. 555. Iss. 7696. P. 363–366. <https://doi.org/10.1038/nature25785>
14. Hu Y., Li C., Wen H., et al. Characteristics of silver minerals in the lead-zinc-silver deposits at the junction of Sichuan, Yunnan, and Guizhou // *Bulletin of Mineralogy, Petrology and Geochemistry*. 2000. Vol. 19. Iss. 4. P. 318–320.
15. Fuge R., Johnson C. The geochemistry of iodine: a review // *Environmental Geochemistry and Health*. 1986. Vol. 8. Iss. 2. P. 31–54. <https://doi.org/10.1007/BF02311063>
16. Muramatsu Y., Yoshida S., Fehn U., Amachi S., Ohmomo Y. Studies with natural and anthropogenic iodine isotopes: iodine distribution and cycling in the global environment // *Journal of Environmental Radioactivity*. 2004. Vol. 74. Iss. 1-3. P. 221–232. <https://doi.org/10.1016/j.jenvrad.2004.01.011>
17. Yamaguchi N., Nakano M., Takamatsu R., Tanida H. Inorganic iodine incorporation into soil organic matter: evidence from iodine K-edge X-ray absorption near-edge structure // *Journal of Environmental Radioactivity*. 2010. Vol. 101. Iss. 6. P. 451–457. <https://doi.org/10.1016/j.jenvrad.2008.06.003>
18. Fuge R. Soils and Iodine Deficiency // *Essentials of medical geology: impacts of the natural environment on public health* / eds. O. Selinus. Dordrecht: Springer Netherlands, 2013. P. 417–432.
19. Peng Y. Study on the distribution and migration of heavy metals in slag, soil and plants in the indigenous zinc smelting district of Northwest Guizhou. Guiyang: Guizhou University, 2018.
20. Li Z., Feng X., Bi X., et al. Pollution status of heavy metals in soil on an indigenous zinc smelting site in Guizhou Province // *Chinese Journal of Ecology*. 2011. Vol. 30. Iss. 5. P. 55–59.
21. Chen F., Dong Z., Wang C., et al. Pollution status and risk assessment of heavy metals in cultivated soil and crops in zinc smelting area // *Environmental Science*. 2017. Vol. 38. Iss. 10. P. 376–385.
22. Li J., Zhong H., Zhu W.G., Bai Z.J., Hu W. Elemental and Sr-Nd isotopic geochemistry of Permian Emeishan flood basalts in Zhaotong, Yunnan Province, SW China // *International Journal of Earth Science*. 2017. Vol. 106. Iss. 2. P. 617–630. <https://doi.org/10.1007/s00531-016-1326-z>
23. Chung S.L., Jahn B.M. Plume-lithosphere interaction in generation of the Emeishan flood basalts at the Permian-Triassic boundary // *Geology*. 1995. Vol. 23. Iss. 10. P. 889–892. [https://doi.org/10.1130/0091-7613\(1995\)023<0889:PLIIGO>2.3.CO;2](https://doi.org/10.1130/0091-7613(1995)023<0889:PLIIGO>2.3.CO;2)
24. Xie X., Ren T. National geochemical mapping and environmental geochemistry – progress in China // *Journal of Geochemical Exploration*. 1993. Vol. 49. Iss. 1-2. P. 15–34. [https://doi.org/10.1016/0375-6742\(93\)90037-M](https://doi.org/10.1016/0375-6742(93)90037-M)
25. Lawton J. Earth system science // *Science*. 2001. Vol. 292. Iss. 5524. P. 1965. <https://doi.org/10.1126/science.292.5524.1965>
26. Bockheim J.G., Gennadiyev A.N. Soil-factorial models and earth-system science: a review // *Geoderma*. 2010. Vol. 159. Iss. 3-4. P. 243–251. <https://doi.org/10.1016/j.geoderma.2010.09.005>

Authorship criteria / Критерии авторства

Hangxin Cheng, Min Peng, Chuandong Zhao, Wei Han, Huiyan Wang, Qiaolin Wang, Fan Yang, Fugui Zhang, Chengwen Wang, Fei Liu, Yalong Zhou, Shiqi Tang, Kuo Li, Ke Yang, Zheng Yang, Xiaomeng Cheng, Ziwan Chen, Hua Zhang, Chunhu Mo are the authors of the article, hold equal copyright and bear equal responsibility for plagiarism.

Чэн Хансинь, Пэн Минь, Чжао Чуандун, Хань Вэй, Ван Хуянь, Ван Цяолинь, Ян Фань, Чжан Фугуй, Ван Чэнвэнь, Лю Фэй, Чжоу Ялун, Тан Шици, Ли Ко, Ян Кэ, Ян Чжэн, Чэн Сяомэн, Чэн Цзывань, Чжан Хуа, Мо Чуньху написали статью, имеют равные авторские права и несут одинаковую ответственность за плагиат.

Responsibility for plagiarism / Конфликт интересов

The authors declare that there is no conflict of interest regarding the publication of this article.
Авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов.

All authors have read and approved the final version of this manuscript.
Все авторы прочитали и одобрили окончательный вариант рукописи.



Information about the authors / Сведения об авторах



Hangxin Cheng,
Doctor's Degree,
Professor,
Institute of Geophysical & Geochemical Exploration,
Chinese Academy of Geological Sciences,
84 Jinguang Road, Langfang 065000, China,
✉ e-mail: 916679036@qq.com

Чэн Хансинь,
доктор,
профессор,
Институт геофизических и геохимических исследований
Китайской академии геологических наук,
065000, г. Ланфан, ул. Цзиньгуан Роуд, 84, Китай,
✉ e-mail: 916679036@qq.com



Min Peng,
Master's Degree,
Engineer,
Institute of Geophysical & Geochemical Exploration,
Chinese Academy of Geological Sciences,
84 Jinguang Road, Langfang 065000, China,
School of Geosciences and Resources,
China University of Geosciences (Beijing),
29 Xueyuan Road, Beijing 100083, China,
e-mail: pm-ant@qq.com

Пэн Минь,
магистр,
инженер,
Институт геофизических и геохимических исследований
Китайской академии геологических наук,
065000, г. Ланфан, ул. Цзиньгуан Роуд, 84, Китай,
Школа геологических наук и природных ресурсов,
Китайский геологический университет (Пекин),
100083, г. Пекин, ул. Сюеюань Роуд, 29, Китай,
e-mail: pm-ant@qq.com



Chuandong Zhao,
Doctor's Degree,
Professor,
Institute of Geophysical & Geochemical Exploration,
Chinese Academy of Geological Sciences,
84 Jinguang Road, Langfang 065000, China,
e-mail: Zhaochuandong@igge.cn

Чжао Чуандун,
доктор,
профессор,
Институт геофизических и геохимических исследований
Китайской академии геологических наук,
065000, г. Ланфан, ул. Цзиньгуан Роуд, 84, Китай,
e-mail: Zhaochuandong@igge.cn

Wei Han,
Master's Degree,
Engineer,
Institute of Geophysical & Geochemical Exploration, Chinese Academy of Geological Sciences,
84 Jinguang Road, Langfang 065000, China,
e-mail: 331224192@qq.com



Хань Вэй,
магистр,
инженер,

Институт геофизических и геохимических исследований Китайской академии геологических наук,
065000, г. Ланфан, ул. Цзиньгуан Роуд, 84, Китай,
e-mail: 331224192@qq.com

Huiyan Wang,
Master's Degree,
Engineer,

Institute of Geophysical & Geochemical Exploration, Chinese Academy of Geological Sciences,
84 Jinguang Road, Langfang 065000, China,
e-mail: wanghuiyan@igge.cn

Ван Хуянь,

магистр,
инженер,

Институт геофизических и геохимических исследований Китайской академии геологических наук,
065000, г. Ланфан, ул. Цзиньгуан Роуд, 84, Китай,
e-mail: wanghuiyan@igge.cn

Qiaolin Wang,
Master's Degree,
Engineer,

Institute of Geophysical & Geochemical Exploration, Chinese Academy of Geological Sciences,
84 Jinguang Road, Langfang 065000, China,
e-mail: 408409647@qq.com

Ван Цяолинь,

магистр,
инженер,

Институт геофизических и геохимических исследований Китайской академии геологических наук,
065000, г. Ланфан, ул. Цзиньгуан Роуд, 84, Китай,
e-mail: 408409647@qq.com

Fan Yang,
Doctor's Degree,
Senior Engineer,

Institute of Geophysical & Geochemical Exploration, Chinese Academy of Geological Sciences,
84 Jinguang Road, Langfang 065000, China,
e-mail: yangfan@igge.cn

Ян Фань,

доктор,
старший инженер,

Институт геофизических и геохимических исследований Китайской академии геологических наук,
065000, г. Ланфан, ул. Цзиньгуан Роуд, 84, Китай,
e-mail: yangfan@igge.cn

Fugui Zhang,
Master's Degree,
Senior Engineer,

Institute of Geophysical & Geochemical Exploration, Chinese Academy of Geological Sciences,
84 Jinguang Road, Langfang 065000, China,
e-mail: zhangfugui@igge.cn

Чжан Фугуй,

магистр,
старший инженер,

Институт геофизических и геохимических исследований Китайской академии геологических наук,
065000, г. Ланфан, ул. Цзиньгуан Роуд, 84, Китай,
e-mail: zhangfugui@igge.cn



Chengwen Wang,

Master's Degree,

Engineer,

Institute of Geophysical & Geochemical Exploration, Chinese Academy of Geological Sciences,
84 Jinguang Road, Langfang 065000, China,

e-mail: 187311220@qq.com

Ван Чэнвэнь,

магистр,

инженер,

Институт геофизических и геохимических исследований Китайской академии геологических наук,
065000, г. Ланфан, ул. Цзиньгуан Роуд, 84, Китай,

e-mail: 187311220@qq.com

Fei Liu,

Doctor's Degree,

Senior Engineer,

Institute of Geophysical & Geochemical Exploration, Chinese Academy of Geological Sciences,
84 Jinguang Road, Langfang 065000, China,

e-mail: 29619105@qq.com

Лю Фэй,

доктор,

старший инженер,

Институт геофизических и геохимических исследований Китайской академии геологических наук,
065000, г. Ланфан, ул. Цзиньгуан Роуд, 84, Китай,

e-mail: 29619105@qq.com

Yalong Zhou,

Master's Degree,

Senior Engineer,

Institute of Geophysical & Geochemical Exploration, Chinese Academy of Geological Sciences,
84 Jinguang Road, Langfang 065000, China,

e-mail: zhouyalong@igge.cn

Чжоу Ялун,

магистр,

старший инженер,

Институт геофизических и геохимических исследований Китайской академии геологических наук,
065000, г. Ланфан, ул. Цзиньгуан Роуд, 84, Китай,

e-mail: zhouyalong@igge.cn

Shiqi Tang,

Master's Degree,

Assistant Engineer,

Institute of Geophysical & Geochemical Exploration, Chinese Academy of Geological Sciences,
84 Jinguang Road, Langfang 065000, China,

e-mail: 642191779@qq.com

Тан Шици,

магистр,

ассистент инженера,

Институт геофизических и геохимических исследований Китайской академии геологических наук,
065000, г. Ланфан, ул. Цзиньгуан Роуд, 84, Китай,

e-mail: 642191779@qq.com

Kuo Li,

Master's Degree,

Engineer,

Institute of Geophysical & Geochemical Exploration, Chinese Academy of Geological Sciences,
84 Jinguang Road, Langfang 065000, China,

e-mail: likuo@igge.cn

**Ли Ко,**магистр,
инженер,Институт геофизических и геохимических исследований Китайской академии геологических наук,
065000, г. Ланфан, ул. Цзиньгуан Роуд, 84, Китай,
e-mail: likuo@igge.cn**Ke Yang,**Doctor's Degree,
Senior Engineer,
Institute of Geophysical & Geochemical Exploration, Chinese Academy of Geological Sciences,
84 Jinguang Road, Langfang 065000, China,
e-mail: 47384668@qq.com**Ян Кэ,**доктор,
старший инженер,
Институт геофизических и геохимических исследований Китайской академии геологических наук,
065000, г. Ланфан, ул. Цзиньгуан Роуд, 84, Китай,
e-mail: 47384668@qq.com**Zheng Yang,**Master's Degree,
Assistant Engineer,
Institute of Geophysical & Geochemical Exploration, Chinese Academy of Geological Sciences,
84 Jinguang Road, Langfang 065000, China,
e-mail: yangzheng@igge.cn**Ян Чжэн,**магистр,
ассистент инженера,
Институт геофизических и геохимических исследований Китайской академии геологических наук,
065000, г. Ланфан, ул. Цзиньгуан Роуд, 84, Китай,
e-mail: yangzheng@igge.cn**Xiaomeng Cheng,**Master's Degree,
Assistant Engineer,
Institute of Geophysical & Geochemical Exploration, Chinese Academy of Geological Sciences,
84 Jinguang Road, Langfang 065000, China,
e-mail: 309498905@qq.com**Чэн Сяомэн,**магистр,
ассистент инженера,
Институт геофизических и геохимических исследований Китайской академии геологических наук,
065000, г. Ланфан, ул. Цзиньгуан Роуд, 84, Китай,
e-mail: 309498905@qq.com**Ziwan Chen,**Master's Degree,
Senior Engineer,
Yunnan Institute of Geological Survey,
84 Renmin East Road, Kunming 650216, China,
e-mail: ChenZW_cdut@outlook.com**Чэнь Цзывань,**магистр,
старший инженер,
Юньнаньский институт Геологической службы,
650216, г. Куньмин, ул. Жэньминь Ист Роуд, 84, Китай,
e-mail: ChenZW_cdut@outlook.com

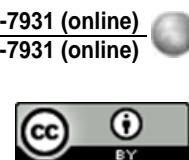


Hua Zhang,
Bachelor's Degree,
Senior Engineer,
Sichuan Geological Survey,
25 Renming Road, Chengdu 610081, China,
e-mail: 258155276@qq.com

Чжан Хуа,
бакалавр,
старший инженер,
Сычуаньская геологическая служба,
610081, г. Чэнду, ул. Жэньминь Ист Роуд, 25, Китай,
e-mail: 258155276@qq.com

Chunhu Mo,
Bachelor's Degree,
Senior Engineer,
Guizhou Geological Survey,
171 Shilin West Road, Guiyang 550081, China,
e-mail: 196189077@qq.com

Мо Чунъху,
бакалавр,
старший инженер,
Геологическая служба Гуйчжоу,
550081, г. Гуйян, ул. Шилинь Вест Роуд, 171, Китай,
e-mail: 196189077@qq.com



Оригинальная статья / Original article

УДК 551.4.022

DOI: <http://dx.doi.org/10.21285/2686-9993-2020-43-3-418-435>

Результаты учебно-производственной практики студентов Института недропользования Иркутского национального исследовательского технического университета (Россия) в Нанкинском Университете (Китай) (6–21 сентября 2019 г.)

© М.А. Вантеева^a, А.О. Устюжанин^b, М.И. Сапрыкина^c,
И.А. Ярощук^d, О.С. Масликов^e, К.К. Ковтун^f, К.В. Бабуева^g,
А.А. Семилет^h, Ю.Е. Гиренкоⁱ, В.В. Тимашева^j, С.М. Соболева^k,
Юнчжань Чжан^l, Л.И. Аузина^m, Р.М. Лобацкаяⁿ, А.А. Войтиук^o

^{a-k,m-o}Иркутский национальный исследовательский технический университет, г. Иркутск, Россия
^lНанкинский университет, г. Нанкин, Китай

Резюме: В статье изложена структура и представлены результаты учебно-производственной практики студентов Института недропользования Иркутского национального исследовательского технического университета (Россия) в Нанкинском университете (Китай), проходившей в период с 6 по 21 сентября 2019 г. Цель работы заключалась в описании исследований, проводившихся на территории Восточного Китая в районе г. Нанкин под руководством профессора Юнчжань Чжан. Основное внимание в ходе полевых маршрутов было направлено на изучение геолого-структурных и географических особенностей Южно-Китайского блока, знакомство с ведущими эндо- и экзогенными процессами на этой территории. При анализе архивных и литературных источников, обобщении материалов полевых наблюдений получены сведения о тектонике и магматизме района, об условиях формирования термальных источников подземных вод Таньшань, о причинах проявления вулканизма и других геодинамических процессах на исследуемой территории, об особенностях гидрологического режима р. Фучуньцзян.

Ключевые слова: Восточный Китай, Южно-Китайский блок, эндогенные процессы, экзогенные процессы, геологическая практика, Нанкин

Информация о статье: поступила в редакцию 06 февраля 2020 г.; поступила после рецензирования и доработки 11 марта 2020 г.; принята к публикации 18 апреля 2020 г.

Для цитирования: Вантеева М.А., Устюжанин А.О., Сапрыкина М.И., Ярощук И.А., Масликов О.С., Ковтун К.К. [и др.]. Результаты учебно-производственной практики студентов Института недропользования Иркутского национального исследовательского технического университета (Россия) в Нанкинском Университете (Китай) (6–21 сентября 2019 г.). *Науки о Земле и недропользование*. 2020. Т. 43. № 3. С. 418–435. <https://doi.org/10.21285/2686-9993-2020-43-3-418-435>

Results of the students' field study (Institute of Subsoil Use, Irkutsk National Research Technical University, Russia) at Nanjing University (China), September 6–21, 2019

© Marina A. Vanteeva^a, Alexander O. Ustyuzhanin^b, Maria I. Saprykina^c,
Ilya A. Yaroshchuk^d, Oleg S. Maslikov^e, Ksenia K. Kovtun^f, Ksenia V. Babueva^g,
Andrey A. Semilet^h, Yury E. Girenkoⁱ, Veronika V. Timasheva^j, Sofya M. Soboleva^k,
Yongzhan Zhang^l, Larisa I. Auzina^m, Raisa M. Lobatskayaⁿ, Alena A. Voitiuk^o

^{a-k,m-o}Irkutsk National Research Technical University, Irkutsk, Russia

^lNanjing University, Nanjing, China

Abstract: The article presents the structure and results of the students' field study program (Institute of Subsoil Use, Irkutsk National Research Technical University, Russia) that took place at Nanjing University (China) in the period September 6–21, 2019. The purpose of the work was to describe the investigations conducted under Professor Yongzhan Zhang in the area of Nanjing, Eastern China. The focus of the field routes was on the study of the geological-structural



and geographical features of the South China block as well as on learning the major endo- and exogenous processes in the area. The analysis of the archive and literary sources and the compilation of the filed observation material has provided data on the tectonics and magmatism of the study area, the conditions of the formation of the Tangshan underground hydrothermal sources, the causes of the volcanism and other geodynamic processes, and the peculiarities of the hydrological regime of the Fuchunjiang River.

Keywords: East China, South China block, endogenous processes, exogenous processes, geological field study, Nanjing

Information about the article: received February 06, 2020; revised March 11, 2020; accepted April 18, 2020.

For citation: Vanteeva MA, Ustyuzhanin AO, Saprykina MI, Yaroshchuk IA, Maslikov OS, Kovtun KK, et al. Results of the students' field study (Institute of Subsoil Use, Irkutsk National Research Technical University, Russia) at Nanjing University (China), September 6–21, 2019. *Nauki o Zemle i nedropol'zovanie* = *Earth sciences and subsoil use*. 2020;43(3):418–435. (In Russ.) <https://doi.org/10.21285/2686-9993-2020-43-3-418-435>

Введение

В соответствии с договором о сотрудничестве между Иркутским национальным исследовательским техническим университетом (ИРНИТУ) (Россия) и Нанкинским университетом (Китай) в 2018 г. были начаты многопрофильные экспедиционные исследования в рамках проекта «Байкал – жемчужина мира». В исследованиях принимали участие китайские преподаватели и студенты, руководили педагоги ИРНИТУ и Иркутского государственного университета. В 2019 г. впервые состоялась ответная поездка студентов Института недропользования ИРНИТУ в Нанкинский университет и экспедиционные работы в восточной части Китая под руководством китайских профессоров. Целями и задачами данной поездки и проведенных в рамках нее исследований являлись: знакомство с культурой, историей и системой образования страны; изучение геологоструктурных особенностей и ведущих геодинамических процессов на территории Восточного Китая.

Объекты исследования

Восточным Китаем называется географическая область, которая охватывает восточную прибрежную зону Китайской Народной Республики. Она включает в себя шесть провинций, а также муниципалитет в г. Шанхай. Город Нанкин – древняя столица Китая, название города в буквальном переводе обозначает «южная столица». Он начинает свою историю с 472 г. до н. э. и является одним из древнейших городов, расположенных в восточной части страны, в 260 км к северо-западу от Шанхая в нижнем течении р. Янцзы.

В настоящее время Нанкин является столицей провинции Цзянсу. На территории города располагается Нанкинский университет, входящий в число пяти самых престижных университетов Китая.

Современный этап в истории университета начался после образования Китайской Народной Республики. С 1950 г. он стал носить актуальное на сегодняшний день название – Нанкинский университет, в связи с этим датой основания университета считается 1952 г. Это мощное высшее учебное заведение, состоящее из 28 высших школ и поддерживающее научные связи с более чем 100 учебными заведениями других стран.

Группа студентов ИРНИТУ работала на базе Нанкинского университета в период с 7 по 20 сентября 2019 г. Исследования проводились в течение 14 дней по весьма разнообразной программе (рис. 1) и охватывали довольно обширную территорию (рис. 2).

С 7 по 9 сентября группа познакомилась со структурой и кампусом университета, 10–17 сентября были проведены полевые исследования, преимущественно в долине р. Янцзы, 18–29 сентября пройдены маршруты в районе г. Нанкин, 19 сентября на базе университета представлены финальные доклады российских студентов на английском языке.

Работа началась с лекционного курса профессоров Нанкинского университета и знакомства с геологией и геоморфологией региона. Были представлены:

– лекция № 1 доктора Шаовэнь Лю «Геологический обзор г. Нанкин и прилегающих к нему территорий»¹;

¹ Liu S. Geological setting of Nanjing and adjacent areas. Nanjing: Nanjing University, 2019. 46 p.



Рис. 1. Программа работы экспедиции (схема авторов)
Fig. 1. Expedition program (scheme by authors)

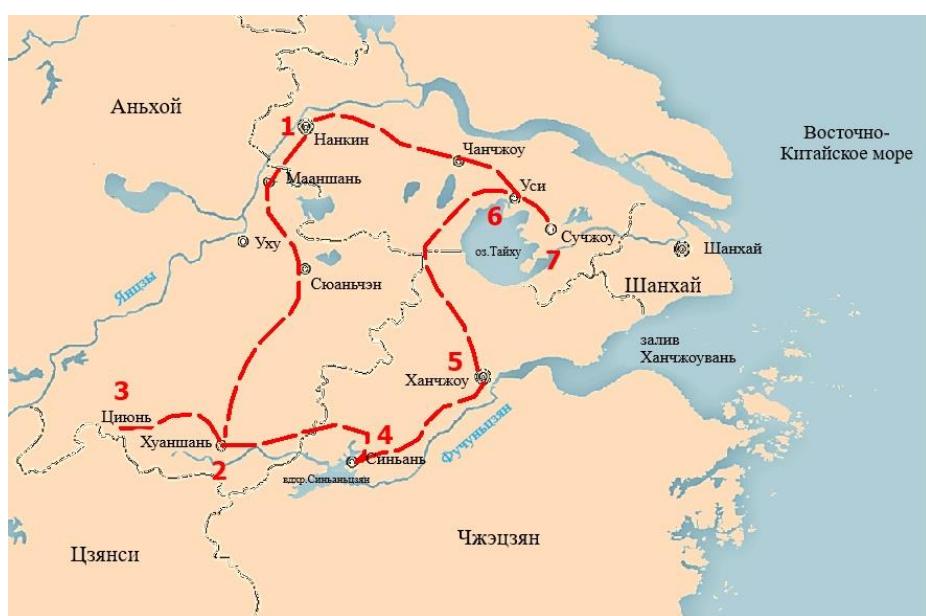


Рис. 2. Маршрут экспедиционных исследований (схема авторов):
1 – г. Нанкин; 2 – горы Хуаншань; 3 – гора Циунь; 4 – водохранилище Цяньдаху; 5 – г. Ханчжоу, 6 – городской округ Уси, 7 – городской округ Сучжоу

Fig. 2. Expedition route (scheme by authors):

1 – Nanjing, 2 – Huanshan mountains, 3 – Qiyun mountain, 4 – Qiandahou lake,
5 – Hangzhou, 6 – Wuxi, 7 – Suzhou

– лекция № 2 профессора Ян Даюань «Неотектонические движения, колебания уровня моря, антропогенная деятельность и их влияние на геоморфологические процессы в дельте р. Янцзы»².

Полевые исследования проводились преимущественно в дельте р. Янцзы, провинциях Цзянси, Аньхой, Чжэцзян (см. рис. 2).

Восточная часть Китая в тектоническом плане приурочена к Южно-Китайскому блоку, который состоит из массивов Янцзы и Катайского [1]. Нанкин и прилегающие к нему территории локализуются в нижней части массива Янцзы.

На территории широко развиты эндогенные процессы, включающие мощные зоны

² Yang D. Neo-tectonic movement, sea-level changes, human activities and impacts to the geomorphological processes in the Yangtze river delta, School of Geography & Ocean Sciences, Nanjing University, 2019. 16 p.



кайнозойского вулканизма, с частью которых российским студентам была предоставлена возможность ознакомиться.

Основными причинами развития вулканизма на исследуемой территории являются коллизия Индийской и Евразийской плит и субдукция Тихоокеанской и Евразийской плит (рис. 3).

Одним из объектов исследований в окрестностях г. Нанкин был вулканический парк Лухе (рис. 4). Лухе – это область, где вулканы интенсивно извергались в период с 9,35 до 10 млн лет назад. Наиболее крупные вулканические структуры – Ваншань, Лингуаншань, Губашань, Гуйцзишань.

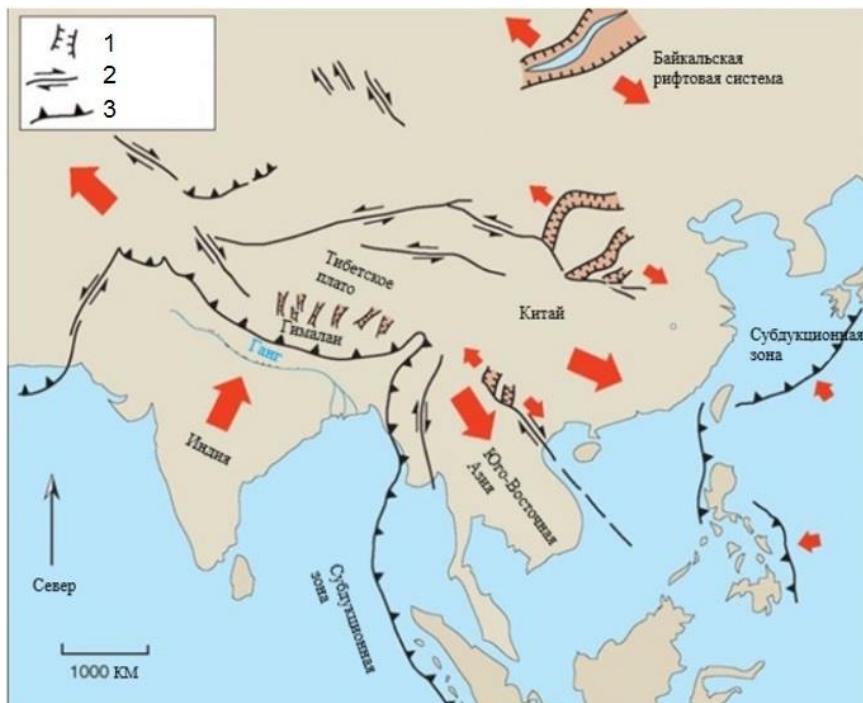


Рис. 3. Схема движения литосферных плит [2]:
1 – рифтовая долина; 2 – сдвиговый разлом; 3 – надвиг

Fig. 3. Pattern of lithospheric plates motion [2]:
1 – rift valley; 2 – shift fault; 3 – overthrust



Рис. 4. Один из вулканов в парке Лухе (фото авторов)
Fig. 4. The Luhe volcano (photo by authors)



В ходе полевых исследований объектами наблюдения также стали горные сооружения Цзыцзыньшань, Хуаншань, Циунь, которые принадлежат орогенному поясу Янцзы (рис. 5).

Гора Цзыцзыньшань (Пурпурная гора), примыкающая к востоку к историческому центру Нанкина (рис. 6), сложена скальными песчаными и глинистыми отложениями юрского периода. Горное сооружение занимает общую площадь в 31 км². Минимальная высота над уровнем моря – 30 м, максималь-

ная – 448,2 м. В ходе маршрута производилось описание объектов и фиксировались замеры элементов залегания пород на точках наблюдения.

Горы Хуаншань (Жёлтые горы) в провинции Аньхой (рис. 7) в совокупности с прилегающими территориями образуют заповедный парк площадью 154 км². Территория характеризуется резкой расчлененностью рельефа: абсолютные отметки варьируют от 500 до 1864 м над уровнем моря.

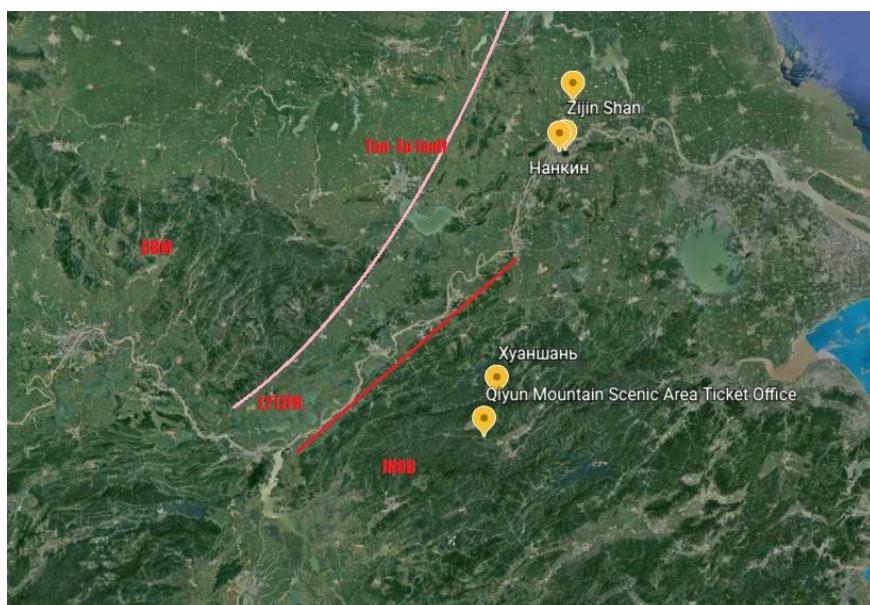


Рис. 5. Орогенный вулканический пояс (рисунок авторов с использованием

сервиса «Google Планета Земля» в качестве основы)

Fig. 5. Zijinshan orogenic belt (figure by authors, made using
Google Earth service as a basis)

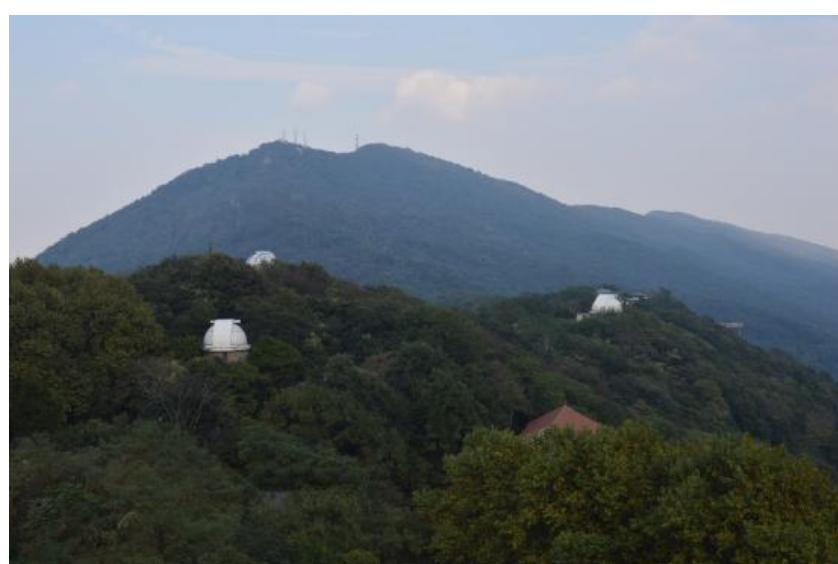


Рис. 6. Гора Цзыцзыньшань (Пурпурная гора) (фото из открытого интернет-источника)

Fig. 6. Zijinshan Mountain (photo from an open Internet source)



Рис. 7. Горы Хуаншань (Жёлтые горы) (фото авторов)
Fig. 7. Huangshan Mountain (photo by authors)

В юрском периоде на территории произошло внедрение магмы гранитного состава и интенсивное воздымание. Далее происходил многостадийный процесс выветривания верхней части земной коры и интрузивных тел, в результате чего образовались гранитные останцы (см. рис. 7).

С начала четвертичного периода в результате прерывистого поднятия сформировалось три уровня эрозионных поверхностей. Первый уровень выделяется на высотах 1865–1500 м, второй уровень соответствует отметкам 1200–1500 м, третий уровень – ниже 1200 м (рис. 8).

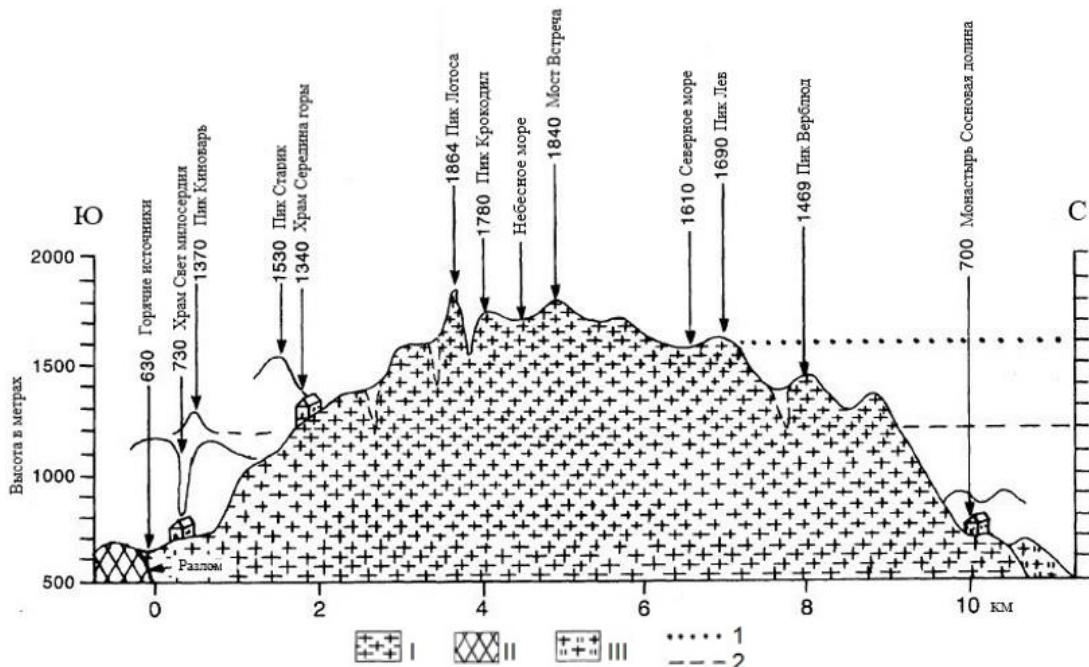


Рис. 8. Геолого-геоморфологический разрез массива Хуаншань с указанием расположения топографических объектов и палеографических и денудационных поверхностей [3]:

I – граниты; II – синийская система; III – гранодиориты

1 – нижняя часть эрозионной поверхности; 2 – нижняя часть денудационной поверхности

Fig. 8. Geological-geomorphological section of Huangshan mountain indicating the location of topographic features and paleogeographic and denudation surfaces [3]:

I – granites; II – Sinian system; III – granodiorites

1 – lower part of the erosion surface; 2 – lower part of the denudation surface



Следующим объектом исследования стал Пик Лотоса, расположенный в Жёлтых горах. Это самая высокая точка на исследуемой площади с абсолютной отметкой 1865 м.

Немаловажным пунктом экспедиционной программы была гора Циунь. Это национальный горный парк, расположенный в уезде Сюнин в провинции Аньхой. Гора известна как одна из четырех священных гор в даосизме Китая. Слагающие ее породы представлены известковым песчаником, известковым алевролитом, алевритовым известняком с прослойками конгломератов мелового возраста, воздействие процессов выветривания, денудации и абразии на которые происходило крайне неравномерно, что привело к образованию останцов, естественных мостов, пещер (рис. 9) [4].

Очередным объектом исследования стали горячие источники Таньшань, также расположенные в окрестностях г. Нанкин. Выходы подземных вод здесь приурочены к тектоническим нарушениям, ориентированным в северо-восточном, северо-западном и субширотном направлениях. Температура горячих источников Таньшань – 53–65 °С. Минерализация – 1,5–2 г/л, характерно относительно высокое содержание сульфатов кальция и магния, а также радона (до 159–201 эман), фтора, стронция, тория и азота, не-

большое количество оксида углерода и кислорода.

Питание подземных вод происходит за счет атмосферных осадков, а источниками тепла являются мантийный тепловой поток и радиогенное тепло мезозойского гранитного тела, температура подземных вод увеличивается с глубиной проникновения зон разрывных нарушений (глубина гидротермальной циркуляции – 3 км) (рис. 10).

Воды горячих источников используются в спа-центрах.

На ряде предыдущих точек студенты ознакомились с широко развитыми процессами физического выветривания. Следующая точка наблюдения – пещера Шанджуань (рис. 11) – является результатом химического выветривания, связанного с выщелачиванием карбонатных пород.

Шанджуань расположена на юго-западе уезда Исин. Она представляет собой четырехуровневую карстовую пещеру. Высота пещер варьирует от 1,5 до 30 м, каждая имеет свои особенности.

Верхний зал пещеры имеет площадь около 1000 м², длину 70 м, ширину 30 м и высоту 30 м. Температура его стабильна и составляет 23 °С, что обусловлено структурой останцов, препятствующей конвекции воздуха между средним и верхним залом пещеры.

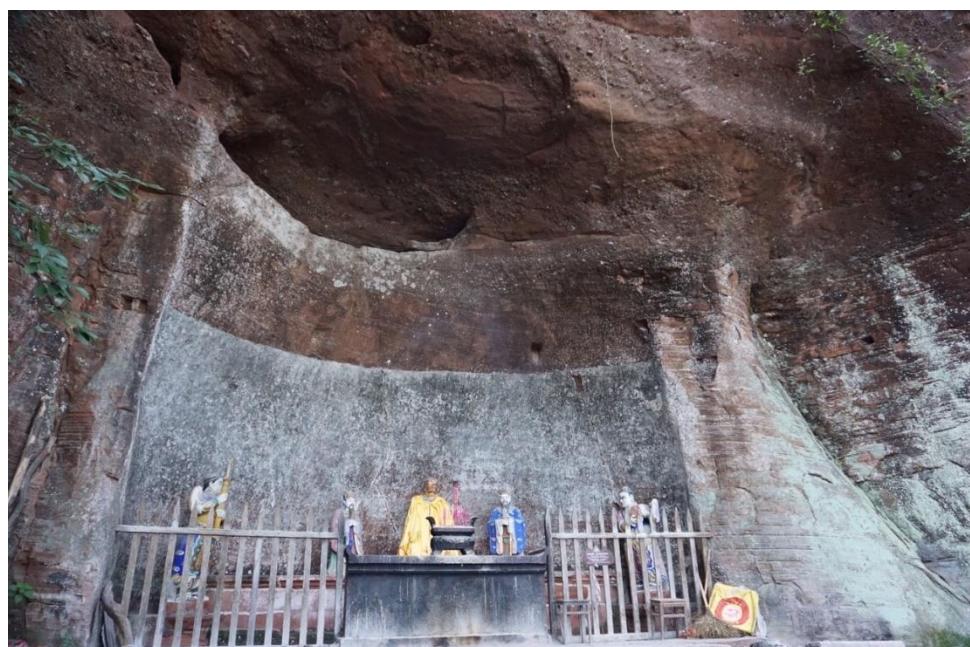


Рис. 9. Результаты выветривания горных пород массива Циуньшань (фото авторов)
Fig. 9. Results of rock weathering, Qiyun Shan Mountain (photo by authors)



Рис. 10. Ресурсное и тепловое питание горячих источников Таньшань:
 1 – выход источника подземных вод; 2 – направление движения потоков подземных вод³

Fig. 10. Feed and discharge mode of Tangshan hot springs:
 1 – underground source outlet; 2 – direction of the underground water streams³



Рис. 11. Один из залов пещеры Шанджуань (фото авторов)
Fig. 11. *Shanjuan Cave (photo by authors)*

Главный вход в пещеру находится на среднем уровне. На этом же уровне наблюдается большое количество сталактитов, сталагмитов и сталагнитов, образовавшихся в результате химического выветривания, некоторые из них украшены стихами и росписями, относящимися к периоду правления династий Лян и Тан.

Пещера нижнего уровня называется «Водопадной». Она имеет длину 180 м, ширину 18 м и высоту 22 м. Снаружи пещеры находятся

дится небольшой водопад высотой 6 м, вода которого инфильтруется под землю и формирует подземную реку.

«Водяная пещера» – это карстовый тоннель со 120-метровой подземной рекой глубиной около 4 м. Путь по ней можно пройти только на лодке. Высота пещеры от поверхности воды не превышает 1,5–2 м.

Организаторы экспедиции выбрали время для того, чтобы студенты могли стать свидетелями уникального природного явления –

³По материалам: Liu S. Geological setting of Nanjing and adjacent areas. Nanjing: Nanjing University, 2019. 46 p.



приливной волны (или бора) на р. Фучуньцзян. Бор образуется во время прилива, когда поступающие в широкий залив массы воды нагнетаются в суженное устье, где они концентрируются, образуя волновой фронт. В некоторых случаях за фронтом следуют одна или несколько одиночных волн. Из-за неоднородности речного дна приливная волна имеет с-образную форму (рис. 12).

Сам же прилив вызывается тем, что в эти дни Солнце, Луна и Земля располагаются на одной прямой и суммарная сила притяжения двух светил усиливает приливную мощь. Волна может достигать 9 м, однако экспеди-

ционному составу повезло меньше: высота волны была около 30–40 см (рис. 13).

Следующий объект – оз. Цяньдаоху (Озеро тысячи островов) – искусственное озеро в провинции Чжэцзян, появившееся в 1959 г. после строительства гидроэлектростанции на р. Синьань (рис. 14).

Воды оз. Цяньдаоху затопили часть горной системы, вершины которой в настоящее время и представляют собой острова (рис. 15), общее их количество достигает 1078. Площадь озера – 600 км², объем воды – 18 км³, суммарная площадь островов – около 86 км².



Рис. 12. Приливная волна на р. Фучуньцзян, г. Ханчжоу (фото из открытого интернет-источника)
Fig. 12. Tidal bore on the Fuchunjiang River, Hangzhou (photo from an open Internet source)



Рис. 13. Приливная волна 14 сентября 2019 г. (фото авторов)
Fig. 13. Tidal bore, September 14, 2019 (photo by authors)



Рис. 14. Озеро Цяньдахоу (Озеро тысячи островов) (фото авторов)
Fig. 14. Qiandao Lake (photo by authors)

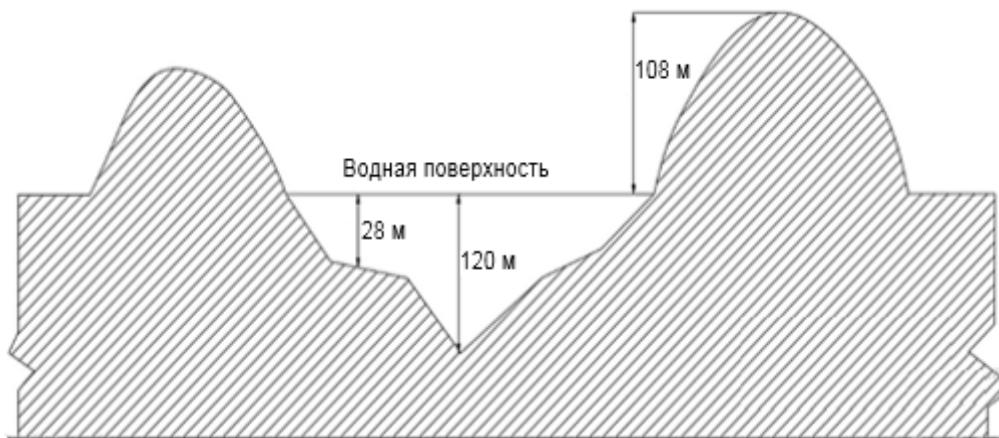


Рис. 15. Разрез озера Цяньдахоу (рисунок автора М.А. Вантеевой):

28 м – средняя глубина озера; 120 м – максимальная глубина озера;

108 м – среднее превышение поверхности островов над урезом воды

Fig. 15. Profile of Lake Qiandao (figure by the author Marina A. Vanteeva):

28 m – average depth of the lake; 120 m – maximum depth of the lake;

108 m – average elevation of the islands' surface above the water's edge

Значительную роль в развитии экосистемы региона играет деятельность человека. В связи с работой многочисленных химических и производственных предприятий в воде оз. Тайху (рис. 16) значительно увеличилось содержание азота и фосфора, из-за чего начиная с 1980-х гг. произошло широкое распространение цианобактерий. К концу 1990-х гг. цветение *Microcystis* стало регулярным летним феноменом. Цианобактерии *Microcystis aeruginosa* выделяют токсины, которые могут повредить печень, кишечный тракт и

нервную систему. В мае 2007 г. масштабное цветение *Microcystis* поразило систему водоснабжения городского округа Уси на северном берегу озера, в результате чего на неделю более двух миллионов человек остались без питьевой воды [5].

Студенты ИРНИТУ посетили лабораторию, работники которой производят мониторинг химического и биологического составов вод оз. Тайху и проводят исследования с целью очистки озера от цианобактерий (рис. 17).



Рис. 16. Озеро Тайху⁴
Fig. 16. Taihu Lake⁴



Рис. 17. Полигон лаборатории мониторинга озера Тайху (фото авторов)
Fig. 17. Monitoring laboratory, Taihu lake (photo by authors)

Во время экспедиции также было уделено внимание и историко-культурным объектам: например, был посещен национальный музей-геопарк Фаншань Таншань (рис. 18), экспозиции которого посвящены как геологии, так и антропологии. Музей занимает 15 га. Он находится в 40 километрах к востоку от Нанкина, недалеко от всемирно значимых археологических памятников, таких как пещеры Нанкин Хулу («человек-обезьяна»), обнаруженные в 1993 г. В пещерах сохранились

окаменелости человека, жившего 160 тыс. лет назад.

На вершине Пурпурной горы располагается обсерватория Цзыцзиньшань (рис. 19), сооруженная в сентябре 1934 г. и явившаяся первым учреждением для проведения современных астрономических исследований в Китае. В музее, расположенном на территории обсерватории, выставлены старинные китайские астрономические приборы.

⁴Zhu G. Taihu Laboratory for Lake Ecosystem Research. 2019.



Рис. 18. Национальный музей-геопарк Фаншань Таншань
(фото из открытого интернет-источника)

Fig. 18. Fangshan Tangshan National Museum-Geopark
(photo from an open Internet source)

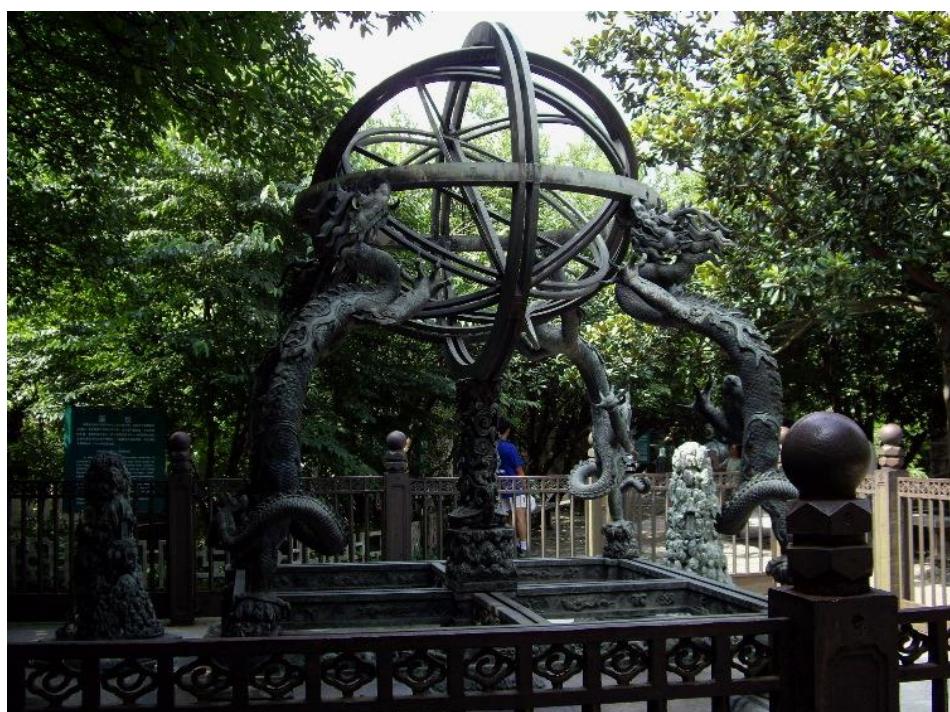


Рис. 19. Экспонат обсерватории Цзыцзиньшань (фото авторов)
Fig. 19. Zijinshan Observatory (photo by authors)

Также при обсерватории на Пурпурной горе в 2015 г. был открыт музей метеоритов. Основание музея метеоритов предложено Сюем Вейбяо, главным ученым из Лаборатории небесной химии и планетарной науки. Это первый музей такого рода в Китае. В музее имеются три выставочных зала, в которых представлены фотографии небесных тел и метеоритов и полные и точные данные о них. Здесь же находятся более 30 уникальных метеоритов из Китая, Швеции, Аргентины, Африки, России и других стран. В музее также представлены украшения, изготовленные

ные с использованием вставок из метеоритов (рис. 20).

Полевые маршруты завершились посещением китайского сада Сучжоу и водного городка Чжоучжуан.

Сучжоу (рис. 21) – самый большой и самый известный сад Китая, принадлежавший бывшему чиновнику и поэту Ван Сяньчэню и раскинувшийся почти на 5 га в одноименном городском округе. Он внесен в список всемирного культурного наследия ЮНЕСКО. Сад Сучжоу существует со времен династии Юань, это целая философская концепция,



Рис. 20. Экспонаты музея метеоритов (фото авторов)
Fig. 20. Exhibits of the Meteorite Museum (photo by authors)

в которой все продумано до мелочей, он был воспет поэтами и художниками в своих неутленных произведениях, после многократных перестроек в 1949 г. раздробленные части сада были, наконец, объединены, и к 1952 г. его облик был восстановлен.

Чжоучжуан – древний городок на воде, названный Восточной Венецией и расположенный в уезде Куньшань городского округа Сучжоу. Он известен своим древним культурным наследием, хорошо сохранившимся старинными жилыми домами и местными традициями и обычаями. В городе проживает около тысячи семей, большинство домов бы-

ло построено во время правления династий Мин и Цин. Именно эти старинные здания, прекрасно сохранившиеся до сегодняшнего дня, привлекают туристов. В 1998 г. город вошел в список историко-культурного наследия ЮНЕСКО.

Результаты исследований

В завершение экспедиции 19 сентября 2019 г. студентами было представлено три отчета на английском языке. Они легли в основу докладов для конференции «Игошинские чтения-2019», а также соответствующих статей.



Рис. 21. Сад Сучжоу (фото авторов)
Fig. 21. Suzhou Garden (photo by authors)



Заключение

Экспедиция в г. Нанкин – уникальная возможность на практике познакомиться с историческим наследием одной из древнейших культур, с геологической историей территории, расположенной в развивающемся в тектоническом отношении регионе, с ее геолого-структурными особенностями, эндогенными и экзогенными геологическими процессами. Научное международное сотрудничество,

особенно во время политически нестабильной ситуации, крайне важно. Авторы данной статьи как студенты, занимающиеся исследовательской деятельностью в области геологии, познакомились с зарубежными коллегами и приобрели опыт международного профессионального общения, получили возможность вести научный диалог, получать консультации иностранных ученых.

Библиографический список

1. Shu L.-S., Faure M., Yu J.-H., Jahn B.-M. Geochronological and geochemical features of the Cathaysia block (South China): new evidence for the Neoproterozoic breakup of Rodinia // *Precambrian Research*. 2011. Vol. 187. Iss. 3-4. P. 263–276. <https://doi.org/10.1016/j.precamres.2011.03.003>
2. Molnar P., Tapponnier P. Cenozoic tectonics of Asia: effects of continental collision // *Science*. 1975. Vol. 189. Iss. 4201. P. 419–426. <https://doi.org/10.1126/science.189.4201.419>
3. Huang P.-H., Diffendal R.F., Yang M.-Q. Structural and geomorphological evolution of Huangshan (Yellow Mountain), Anhui Province, China // *Natural Resources*. 2002. Vol. 120. P. 109–124.
4. Ma C., Zhu C., Peng H., Zheng C., Xiang F., Sun Y., et al. Danxia landform genesis of the Qiyun Mountain, Anhui Province // *Journal of Geographical Sciences*. 2006. Vol. 16. Iss. 1. P. 45–56. <https://doi.org/10.1007/s11442-006-0105-3>
5. Tang X., Krausfeldt L.E., Shao K., LeCleir G.R., Stough J.M.A., Gao G., et al. Seasonal gene expression and the ecophysiological implications of toxic *Microcystis aeruginosa* blooms in Lake Taihu // *Environmental Science & Technology*. 2018. Vol. 52. P. 11049–11059. <https://doi.org/10.1021/acs.est.8b01066>

References

1. Shu LS, Faure M, Yu JH, Jahn BM. Geochronological and geochemical features of the Cathaysia block (South China): new evidence for the Neoproterozoic breakup of Rodinia. *Precambrian Research*. 2011;187(3-4):263–276. <https://doi.org/10.1016/j.precamres.2011.03.003>
2. Molnar P, Tapponnier P. Cenozoic tectonics of Asia: effects of continental collision. *Science*. 1975;189(4201):419–426. <https://doi.org/10.1126/science.189.4201.419>
3. Huang PH, Diffendal RF, Yang MQ. Structural and geomorphological evolution of Huangshan (Yellow Mountain), Anhui Province, China. *Natural Resources*. 2002;120:109–124.
4. Ma C, Zhu C, Peng H, Zheng C, Xiang F, Sun Y, et al. Danxia landform genesis of the Qiyun Mountain, Anhui Province. *Journal of Geographical Sciences*. 2006;16(1):45–56. <https://doi.org/10.1007/s11442-006-0105-3>
5. Tang X, Krausfeldt LE, Shao K, LeCleir GR, Stough JMA, Gao G, et al. Seasonal gene expression and the ecophysiological implications of toxic *Microcystis aeruginosa* blooms in Lake Taihu. *Environmental Science & Technology*. 2018;52:11049–11059. <https://doi.org/10.1021/acs.est.8b01066>

Критерии авторства / Authorship criteria

Вантеева М.А., Устюжанин А.О., Сапрыкина М.И., Ярошук И.А., Масликов О.С., Ковтун К.К., Бабуева К.В., Семилет А.А., Гиренко Ю.Е., Тимашева В.В., Соболева С.М., Чжан Юнчжань, Аузина Л.И., Лобацкая Р.М., Войтиук А.А. написали статью, имеют равные авторские права и несут одинаковую ответственность за плагиат.

Marina A. Vanteeva, Alexander O. Ustyuzhanin, Maria I. Saprykina, Ilya A. Yaroshchuk, Oleg S. Maslikov, Ksenia K. Kovtun, Ksenia V. Babueva, Andrey A. Semilet, Yury E. Girenko, Veronika V. Timasheva, Sofya M. Soboleva, Yongzhan Zhang, Larisa I. Auzina, Raisa M. Lobatskaya, Alena A. Voitiuk are the authors of the article, hold equal copyright and bear equal responsibility for plagiarism.

Конфликт интересов / Responsibility for plagiarism

Авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов.

The authors declare that there is no conflict of interest regarding the publication of this article.



Все авторы прочитали и одобрили окончательный вариант рукописи.
All authors have read and approved the final version of this manuscript.

Сведения об авторах / Information about the authors



Вантеева Марина Андреевна,
студентка,
Иркутский национальный исследовательский технический университет,
664074, г. Иркутск, ул. Лермонтова, 83, Россия,
e-mail: vanteeva98@mail.ru
Marina A. Vanteeva,
Student,
Irkutsk National Research Technical University,
83 Lermontov St., Irkutsk 664074, Russia,
e-mail: vanteeva98@mail.ru



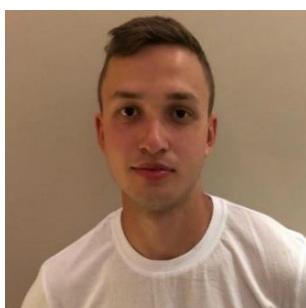
Устюжанин Александр Олегович,
магистрант,
Иркутский национальный исследовательский технический университет,
664074, г. Иркутск, ул. Лермонтова, 83, Россия,
e-mail: al.ust7@yandex.ru
Alexander O. Ustyuzhanin,
Master Degree Student,
Irkutsk National Research Technical University,
83 Lermontov St., Irkutsk 664074, Russia,
e-mail: al.ust7@yandex.ru



Сапрыкина Мария Игоревна,
студентка,
Иркутский национальный исследовательский технический университет,
664074, г. Иркутск, ул. Лермонтова, 83, Россия,
e-mail: msaprykina@live.ru
Mariya I. Saprykina,
Student,
Irkutsk National Research Technical University,
83 Lermontov St., Irkutsk 664074, Russia,
e-mail: msaprykina@live.ru



Ярощук Илья Александрович,
студент,
Иркутский национальный исследовательский технический университет,
664074, г. Иркутск, ул. Лермонтова, 83, Россия,
e-mail: ilya.yaroshchuk@yandex.ru
Ilya A. Yaroshchuk,
Student,
Irkutsk National Research Technical University,
83 Lermontov St., Irkutsk 664074, Russia,
e-mail: ilya.yaroshchuk@yandex.ru



Масликов Олег Сергеевич,
студент,
Иркутский национальный исследовательский технический университет,
664074, г. Иркутск, ул. Лермонтова, 83, Россия,
e-mail: maslikov-oleg@mail.ru
Oleg S. Maslikov,
Student,
Irkutsk National Research Technical University,
83 Lermontov St., Irkutsk 664074, Russia,
e-mail: maslikov-oleg@mail.ru



Ковтун Ксения Константиновна,
студентка,
Иркутский национальный исследовательский технический университет,
664074, г. Иркутск, ул. Лермонтова, 83, Россия,
e-mail: 89500941046k@gmail.com
Ksenia K. Kovtun,
Student,
Irkutsk National Research Technical University,
83 Lermontov St., Irkutsk 664074, Russia,
e-mail: 89500941046k@gmail.com



Бабуева Ксения Владимировна,
студентка,
Иркутский национальный исследовательский технический университет,
664074, г. Иркутск, ул. Лермонтова, 83, Россия,
e-mail: ksyu.babueva@mail.ru
Kseniya V. Babueva,
Student,
Irkutsk National Research Technical University,
83 Lermontov St., Irkutsk 664074, Russia,
e-mail: ksyu.babueva@mail.ru



Семилет Андрей Алексеевич,
студент,
Иркутский национальный исследовательский технический университет,
664074, г. Иркутск, ул. Лермонтова, 83, Россия,
e-mail: andrey.semilet.99@mail.ru
Andrey A. Semilet,
Student,
Irkutsk National Research Technical University,
83 Lermontov St., Irkutsk 664074, Russia,
e-mail: andrey.semilet.99@mail.ru



Гиренко Юрий Евгеньевич,
студент,
Иркутский национальный исследовательский технический университет,
664074, г. Иркутск, ул. Лермонтова, 83, Россия,
e-mail: girenkoyuri@mail.ru
Yuri E. Girenko,
Student,
Irkutsk National Research Technical University,
83 Lermontov St., Irkutsk 664074, Russia,
e-mail: girenkoyuri@mail.ru



Тимашева Вероника Валерьевна,
студентка,
Иркутский национальный исследовательский технический университет,
664074, г. Иркутск, ул. Лермонтова, 83, Россия,
e-mail: verona.tima@gmail.com
Veronika V. Timasheva,
Student,
Irkutsk National Research Technical University,
83 Lermontov St., Irkutsk 664074, Russia,
e-mail: verona.tima@gmail.com



Соболева Софья Михайловна,
студентка,
Иркутский национальный исследовательский технический университет,
664074, г. Иркутск, ул. Лермонтова, 83, Россия,
e-mail: sonyairkutsk04@gmail.com
Sofia M. Soboleva,
Student,
Irkutsk National Research Technical University,
83 Lermontov St., Irkutsk 664074, Russia,
e-mail: sonyairkutsk04@gmail.com



Чжан Юнчжань,
кандидат наук,
Школа географии и океанологии,
Нанкинский университет,
210023, г. Нанкин, просп. Сянълинь, 163, Китай,
e-mail: zhangyzh@nju.edu.cn
Yongzhan Zhang,
PhD,
School of Geography & Ocean Science,
Nanjing University,
163 Xianlin Ave, Nanjing 210023, China,
e-mail: zhangyzh@nju.edu.cn



Аузина Лариса Ивановна,
кандидат геолого-минералогических наук, доцент,
доцент кафедры прикладной геологии,
геофизики и геоинформационных систем,
Институт недропользования,
Иркутский национальный исследовательский технический университет,
664074, г. Иркутск, ул. Лермонтова, 83, Россия,
✉ e-mail: lauzina@mail.ru
Larisa I. Auzina,
Cand. Sci. (Geol. & Mineral.), Docent,
Associate Professor, Department of Applied Geology,
Geophysics, and Geoinformation Systems,
Institute of Subsoil Use,
Irkutsk National Research Technical University,
83 Lermontov St., Irkutsk 664074, Russia,
✉ e-mail: lauzina@mail.ru

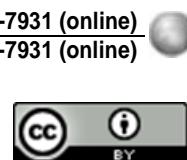


Лобацкая Раиса Моисеевна,
доктор геолого-минералогических наук, профессор,
заведующая кафедрой ювелирного дизайна и технологий,
Институт недропользования,
Иркутский национальный исследовательский технический университет,
664074, г. Иркутск, ул. Лермонтова, 83, Россия,
e-mail: lobatskaya@gmail.com
Raisa M. Lobatskaya,
Dr. Sci. (Geol. & Mineral.), Professor,
Head of the Department of Jewelry Design and Technology,
Institute of Subsoil Use,
Irkutsk National Research Technical University,
83 Lermontov St., Irkutsk 664074, Russia,
e-mail: lobatskaya@gmail.com



Войтюк Алена Александровна,
зам. директора по научной и международной деятельности,
Институт недропользования,
Иркутский национальный исследовательский технический университет,
664074, г. Иркутск, ул. Лермонтова, 83, Россия,
e-mail: alena_vojtuk@mail.ru

Alena A. Vojtuk,
Deputy Director on Scientific and International Activities,
Institute of Subsoil Use,
Irkutsk National Research Technical University,
83 Lermontov St., Irkutsk 664074, Russia,
e-mail: alena_vojtuk@mail.ru



Оригинальная статья / Original article

УДК 591.5

DOI: <http://dx.doi.org/10.21285/2686-9993-2020-43-3-436-446>

The correlation analysis between ant mounds and plant resource in Olkhon region

© Xu Wang^a, Qingxi Hu^b, Weizheng Kong^c, Chenyang Zhang^d, Shan Jia^e, Yuan Chang^f, Wei Deng^g, Andrey V. lishtva^h, Victor G. Shilenkovⁱ, Zhongqiu Li^j, Xingjun Tian^k

^{a-g,j,k}Nanjing University, Nanjing, China

^{h,i}Irkutsk State University, Irkutsk, Russia

Abstract: Olkhon region in East Siberia has abundant and unique vegetation and animal resource for its peculiar geographic location, including ants. Ant, recognized as ecosystem engineers, has an important role in ecosystem. In order to investigate the ecological role of mound-building ants in this region, we focused our attention on the correlation between the distribution of ant mounds and plant species. Five quadrats (5 m × 5 m) were set up in this region, each of which was then divided into twenty-five quadrats (1 m × 1 m). We collected the location of every Black Bog Ant (*Formica candida*) mound, the number and biomass of various plants in every small quadrat. Using matrices, we tested the distribution pattern of ant mound randomly. The correlation between plants and ant mound pattern was tested by correlation analysis and regression analysis. The result showed that the spatial distribution of ant mound was random. We also found that *Artemisia frigida*, *Carex duriuscula* and *Oxytropis sylvestris* had a significant linear relationship with the spatial distribution of ant mound ($P < 0.05$), suggesting that the spatial distribution of ant mound was dependent on the spatial distribution of some plants. The underlying mechanism was further studied. We attributed this correlation to the feeding habits and foraging strategies of Black Bog Ant and tissue structure of these three plants. Our study figured out the interaction between Black Bog Ant and plant resource in Olkhon region, laying down the foundation for future study on the co-evolution of plant and animal resource in this unique ecosystem.

Keywords: ant mounds, spatial distribution pattern, plant biodiversity, correlation analysis, Olkhon region

Information about the article: received June 25, 2020; revised July 30, 2020; accepted August 21, 2020.

For citation: Wang Xu, Hu Qingxi, Kong Weizheng, Zhang Chenyang, Jia Shan, Chang Yuan, et al. The correlation analysis between ant mounds and plant resource in Olkhon region. *Nauki o Zemle i nedropol'zovanie = Earth sciences and subsoil use*. 2020;43(3):436–446. (In Russ.) <https://doi.org/10.21285/2686-9993-2020-43-3-436-446>

Корреляционный анализ между размещением муравейников и растительными ресурсами в Ольхонском регионе

© Сюй Ван^a, Цинси Ху^b, Вэйчжэн Кун^c, Чэньян Чжан^d, Шань Цзя^e, Юань Чан^f, Вэй Дэн^g, А.В. Лиштва^h, В.Г. Шиленковⁱ, Чжунцю Ли^j, Синзюнь Тянь^k

^{a-g,j,k}Нанкинский университет, г. Нанкин, Китай

^{h,i}Иркутский государственный университет, г. Иркутск, Россия

Резюме: Ольхонский регион как часть Восточной Сибири обладает богатыми и уникальными растительными и животными ресурсами благодаря специальному географическому расположению. Муравьи, в свою очередь, являются важной составной частью экосистемы и играют в ней важную роль. В целях исследования экологической роли муравьев-строителей в этом регионе авторы данной статьи обратили внимание на корреляцию между расположением муравейников и видами растений. В районе исследований были выбраны пять пробных площадей (5 м × 5 м), каждая из которых затем была разделена на двадцать пять квадратов (1 м × 1 м). Отмечалось местонахождение каждого муравейника, сооруженного *Formica candida*, количество, видовой состав и биомасса различных растений в каждом малом квадрате. С использованием матриц случайным образом тестировалась картина распределения муравейников. Корреляцию между растениями и расположением насыпей муравьев проверяли с помощью корреляционного и регрессионного анализа. Результат показал, что пространственное распределение муравейников оказалось случайным. Также было обнаружено, что растения *Artemisia frigida*, *Carex duriuscula* и *Oxytropis sylvestris* имели значительную линейную связь с пространственным распределением муравейников ($P < 0.05$), предполагается, что пространственное распределение муравейников зависит от пространственного распределения некоторых растений. Авторы связали эту корреляцию с привычками питания и стратегиями старения черного болотного муравья, а также со структурой тканей указанных трех видов растений. Проведенное



исследование выявило взаимодействие между муравьем и некоторыми видами растений в Ольхонском регионе и может являться основой для будущих исследований совместной эволюции растительных и животных ресурсов в этой уникальной экосистеме.

Ключевые слова: муравейники, пространственное распространение, биоразнообразие растений, корреляционный анализ, Приольхонье

Информация о статье: поступила в редакцию 25 июня 2020 г.; поступила после рецензирования и доработки 30 июля 2020 г.; принята к публикации 21 августа 2020 г.

Для цитирования: Ван Сюй, Ху Цинси, Кун Вэйчжэн, Чжан Чэнъян, Цзя Шань, Чан Юань [и др]. Корреляционный анализ между размещением муравейников и растительными ресурсами в Ольхонском регионе. *Науки о Земле и недропользование*. 2020. Т. 43. № 3. С. 436–446. <https://doi.org/10.21285/2686-9993-2020-43-3-436-446>

Introduction

Olkhon region, located on the western shore of Lake Baikal in East Siberia, has a combined climate pattern of continental climate and maritime climate due to the huge water body of Lake Baikal. Its unique climate pattern and topography nurture rich biological resources, including some endemic species. A total of 118 families and 494 genera of vascular plants have been recorded in this area. Among them, Asteraceae, Poaceae, and Cyperaceae are the main families, and they account for 51 % of genera and 59 % of species. Animal resources are also abundant, with more than 1,600 aquatic animal species.

Among commonly spotted animals, ant, the highly socialized hymenopteran, is recognized as one of the most important arthropods in the soil who plays a vital role in ecosystem. The foraging behavior of ants plays an important role in the food web and energy cycle. It changes the flow of matter and energy - organic matter is buried deeper, small particles are brought to the surface, soil porosity is increased, moisture is dispersed and gas is released [1, 2]. The ant mounds surface is also rich in C, N and other elements [3]. These physical and chemical changes will affect the soil microenvironment and nutrient cycling, and then affect the structure of plant resources. Studies have proven that ants have formed a symbiotic relationship with many plants in a long-term evolution process [4]. For example, ants can help spread plant seeds and to some extent affect the community structure of some temperate forests [4]. On the other hand, plants provide food and habitat for ants. The reciprocal relationship between the ants and plants not only facilitates the restoration of natural communities, but also promotes their evolution. For these reasons, international studies have used ants as a biological indicator to detect environmental and biodiversity

changes [5, 6]. However, the current research on ants mainly focuses on taxonomy, fauna and biodiversity [7]. Studies on other aspects, especially the correlation between their mound-building activities and plants are still very few.

Meanwhile, the spatial distribution pattern of insect populations is an important property of the population [8]. The spatial pattern of the population shows the distribution of individual in the horizontal space, which is the combinational result of the population characteristics, interspecies relationships, and environmental conditions [9]. It also reflects the population dynamics and community succession trend [10]. Therefore, the spatial distribution pattern of ant mounds is a good indicator of ant mound-building activity.

In this study, we investigated the spatial distribution pattern of Black Bog Ant (*Formica candida*), the dominant ant species in Olkhon region, and the distribution structure of plant resources. We set up a correlation model for the distribution of Black Bog Ant mounds and plants to explore their interaction.

Material and methods

The investigation was conducted on five 5 m × 5 m grassland at Chernorud Camp, Olkhon. Each quadrat was divided into 1 m × 1 m quadrats. Location of ant mounds, along with the quantities and biomass of plant species were recorded. Biomass was calculated based on the average weight of 3 individuals after air drying.

We used the *K* function with the spatstat language pack of the statistic software R (3.5.2) to study the spatial distribution of the ant mounds [11, 12]. *K* function was put forward by Ripley [13]:

$$\hat{K}(r) = \frac{A}{n^2} \sum_{i=1}^n \sum_{j=1, j \neq i}^n w_{ij}^{-1} I_r(u_{ij}).$$

A represents the area of the quadrat, n represents the number of the ant mound in the quadrat, u_{ij} represents the distance between the ant mound i and j , and w_{ij} represents weighting, which is used to eliminate the Edge Effect. Noticeably, when $u_{ij} \leq r$, $I_r(u_{ij}) = 1$, and when $u_{ij} > r$, $I_r(u_{ij}) = 0$.

We used Monte Carlo method with R (3.5.2) to generate the upper and lower envelop curve at random [14]. The number of the data point was the same with the observation point. If $K(r)$ falls between two envelop curves, the ant mound resigns to random distribution. If it is over the upper envelop curve, the ant mound resigns to clumped distribution. If it falls below the lower envelop curve, the ant mound resigns to uniform distribution [15].

Correlation analysis uses the Nonparametric tests to test significant difference between distributions of two population. In this experiment, the analysis was done by applying Spearman Analysis whose function is shown below [16].

$$\rho = \frac{\sum_{i=1}^n (x_i - \bar{x})(y_i - \bar{y})}{\sqrt{\sum_{i=1}^n (x_i - \bar{x})^2 \sum_{i=1}^n (y_i - \bar{y})^2}}.$$

Lm function with R 3.5.2 was applied for the multiple regression analysis. Full regression model of the total biomass of all collected plants against the number of the ant mound in quadrats was established. The variance inflation factor (VIF) was used to determine collinearity. We defined multicollinearity when $VIF > 5$. Stepwise regression was done by applying Step function for preliminary screening for variables and modeling with those candidates according to Akaike information criterion (AIC). Afterwards multiple regression model of the total biomass of the collected plants and the ant mound was established by the total biomass of each plant species. This model identified the plant species that have greater effect on the ant mound distribution in the overall environment and their corresponding effect.

Results

Figure 1 presents 188 *F. candida* mounds, including 20 from quadrat a, 17 from quadrat b, 40 from quadrat c, 35 from quadrat d and 76 from quadrat e.

According to the result of the K Function (Fig. 2), Kobs values (the actual value of $K(r)$)

of quadrat 1–3, 5 lie inside the envelope, so the ant mounds in these four quadrats are randomly distributed on the scale of 0–1.2 m. The result of quadrat 4 displays a different result. Ant mounds are clustered on the scale of 0–1 m, but resign to random distribution on a broader scale.

We identified 25 plant species at Chernorud Camp and yielded the biomass of each plants. Based on the biomass, we conducted correlation analysis by Spearman (Table 1). The results show that the biomass of *Artemisia frigida* ($\rho_6 = 0.442$, $P = 0.038$), *Carex duriuscula* ($\rho_{10} = -0.367$, $P = 0.029$) and *Oxytropis sylvestris* ($\rho_{19} = -0.287$, $P = 0.031$) have significant correlation with the distribution of ant mounds. The biomass of *Artemisia frigida* is positively correlated with ant mounds, while the biomass of the other two plants, *Carex duriuscula* and *Oxytropis sylvestris* has negative correlation individually. The result suggests extensive interaction between these three plants and ant mounds.

Shannon-Wiener biodiversity index and Simpson biodiversity index were selected as indicators of plant biodiversity to correlate with ant mounds on different scales. On the small scale (1 m × 1 m), the correlation coefficient of Shannon-Wiener biodiversity index ($\rho_{\text{Sh-W}}$) is 0.157 ($P = 0.08$) and that of Simpson biodiversity index (ρ_{Simpson}) is 0.165 ($P = 0.067$). Although the P values are all greater than 0.05, we still suppose that the spatial distribution of ant mounds and plant biodiversity tend to have a positive correlation.

When the scale comes to 5 m × 5 m, the P values are greater than 0.1 (Table. 2), suggesting that the spatial distribution of ant mounds has no correlation with plant biodiversity.

To exclude the influence of the possible correlations between variables, we further conducted the multiple regression analysis. We identified plant species that have multicollinearity, and chose the smallest model which contained the biomass of 8 plant species as independent variables by the stepwise regression (Table. 3). The output of the model after stepwise regression show that the distribution of ant mounds is positively correlated with the biomass of *O. spinosa*, *C. daurica*, *A. commutata* and *A. frigida*, while is negatively correlated with the biomass of *P. ambigua*, *C. squarrosa*, *O. sylvestris* and *C. duriuscula*.

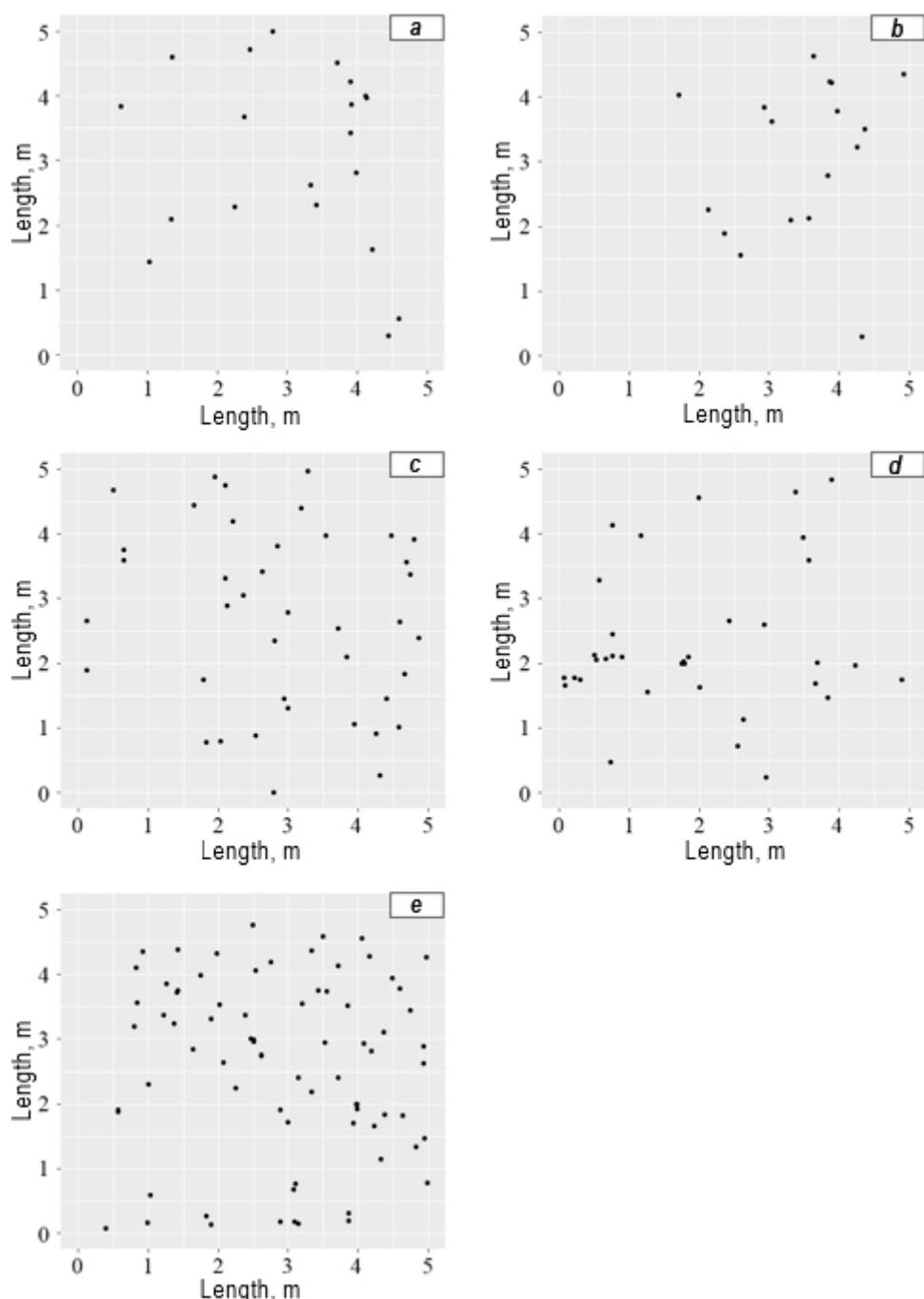


Fig. 1. Distribution of ant mounds

Quadrat numbers (a–e) are marked in each plot

Рис. 1. Распределение муравейников на пяти пробных площадях

На каждом из графиков отмечены числа квадрата (а–е)

Comparing the standard coefficients with each plants, *A.frigida* ($P = 0.031$), *O.sylvestris* ($P = 0.018$) and *C.duriuscula* ($P = 0.001$) have significant influence on the distribution of ant mounds. The result is consistent with that obtained from the correlation analysis.

The output of the model can be concluded as following:

$$Y = 1.829 + 0.019X_{O.\text{spinosa}} + 0.179X_{C.\text{daurica}} - 0.063X_{P.\text{ambigua}} - 0.703X_{C.\text{squarrosa}} + 0.047X_{A.\text{commutata}} + 0.060X_{A.\text{frigida}} - 0.062X_{O.\text{sylvestris}} - 0.063X_{C.\text{duriuscula}}$$

Discussion

In this study, by collecting the relevant data of plants and ant mound in Olkhon, we tried to

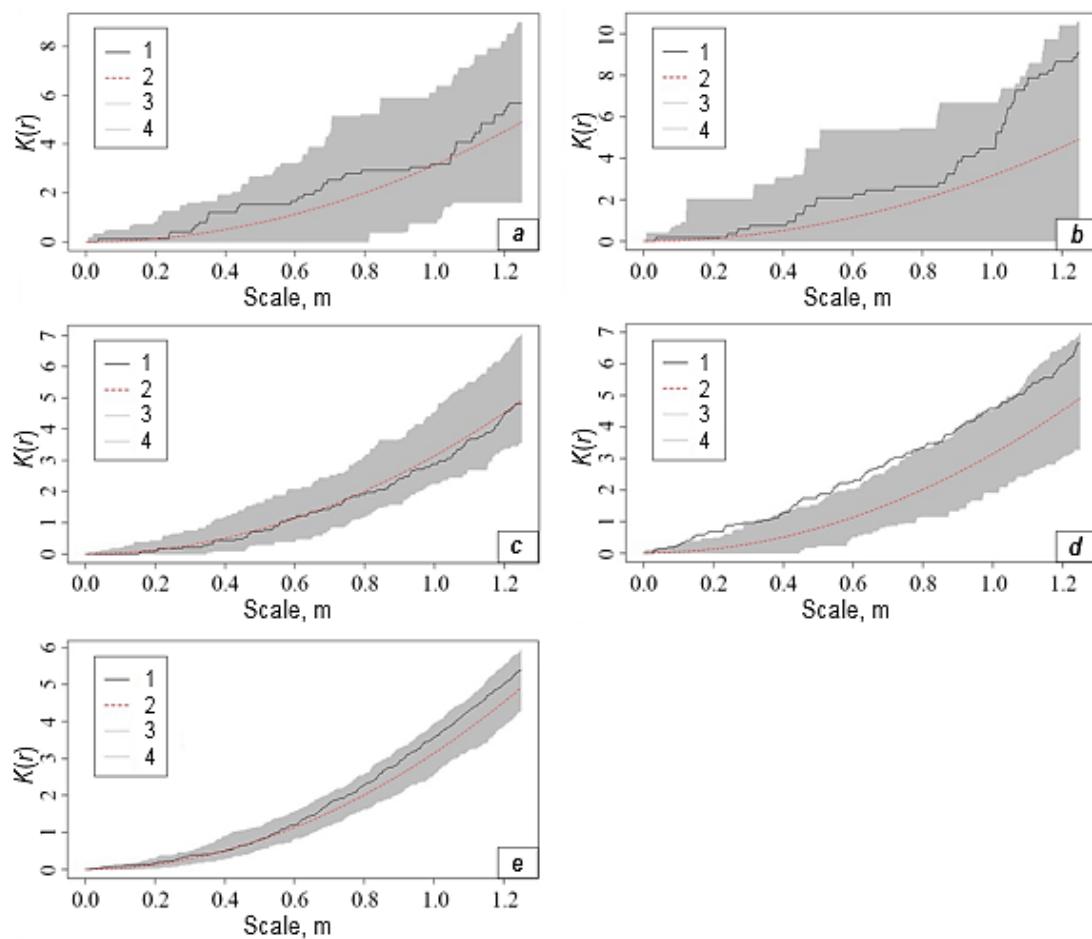


Fig. 2. Test result of the K Function on the basis of the ant mound coordinates:

1 – $\hat{K}_{obs}(r)$, the observation value; 2 – $K_{theo}(r)$, the theoretical value;
3 – $\hat{K}_{hi}(r)$, the upper envelope; 4 – $\hat{K}_{lo}(r)$, the lower envelope

Рис. 2. Результат проверки по функции К на основе расположения муравейников на пяти пробных точках:

1 – $\hat{K}_{obs}(r)$, в результате наблюдения; 2 – $K_{theo}(r)$, теоретическое значение;
3 – $\hat{K}_{hi}(r)$, верхняя кривая; 4 – $\hat{K}_{lo}(r)$, нижняя кривая

establish the correlation model of plant quantity and biomass and ant mound distribution. The results showed that on the scale of 5 m × 5 m, the mound distributions of the bright black ant in quadrat 1–3 and 5 were random, and that in quadrat 4 was clustered. Generally speaking, the spatial distribution pattern of ant mound will change with a series of ecological factors including vegetation and soil conditions. When the surface environment and soil environment are more conducive to the nest settlement of ants, the aggregation degree of ant mound will increase, and more tend to cluster distribution [7]. However, the point pattern analysis method we chose ignored the environmental heterogeneity, so the cluster distribution of ant nest in quadrat 4 was probably due to its favorable geographical location for the settlement of bright black ants.

Ants, as the most widely distributed species and quantitative social insects on the earth, are socially ordered and efficient in foraging. To acquire the efficiency, ants adjust their foraging strategies and nesting positions to the resource distribution. Supposing the distribution of plants is greatly affected by environmental factors such as water and soil, the distribution of ant mounds in turn may be more affected by food resources. Thus, we hypothesized that the distribution of ant mounds is related to the distribution of plants species. In this survey, we found that plant biodiversity or most of the plant species had little impact on ant mound, with an almost no significant relationship. However, the total biomass of *Artemisia frigida*, *Carex duriuscula* and *Oxytropis sylvestris* had a more significant correlation with the numbers of nearby ant mounds.



Table 1. Correlation analysis of plant biomass and the distribution of ant mounds

Таблица 1. Корреляционный анализ между биомассой растений и распределением муравейников

Plant ID	Scientific name	Plant biomass in each quadrat, g					Correlation coefficient ρ	P value
		1	2	3	4	5		
1	<i>Agropyron cristatum</i>	79.2	2.4	9.6	36	228.6	0.206	0.304
2	<i>Allium ramosum</i>	0	0	0	0	37.1	0.384	0.86
3	<i>Allium schoenoprasum</i>	0	0	0.9	0	0	-0.014	0.92
4	<i>Allium tenuissimum</i>	0	0	0	1.1	0	0.008	0.785
5	<i>Artemisia commutata</i>	149.6	58.3	138.6	80.3	0	-0.072	0.066
6	<i>Artemisia frigida</i>	0	0	0	0	433.6	0.442	0.038
7	<i>Aster alpinus</i>	67.5	192.5	220	247.5	0	-0.123	0.967
8	<i>Bupleurum scorzonerifolium</i>	121.8	151.2	56.7	178.5	3.2	-0.206	0.585
9	<i>Caragana pygmaea</i>	0	0	0	0	17.4	0.256	0.377
10	<i>Carex duriuscula</i>	269.5	21.7	60.9	128.8	0	-0.367	0.029
11	<i>Carum carvi</i>	1.5	9	22.5	15	0	0.025	0.669
12	<i>Cleistogenes squarrosa</i>	0	0	0	0	15	0.243	0.162
13	<i>Cymbalaria daurica</i>	0	0	0	0	69.6	0.382	0.108
14	<i>Eremogone meyeri</i>	379.5	21	432	175.5	152	0.074	0.902
15	<i>Filifolium sibiricum</i>	46.5	1.1	15	3	0	-0.248	0.733
16	<i>Iris ruthenica</i>	2.4	0.6	1.8	3.6	0	-0.085	0.733
17	<i>Koeleria macrantha</i>	0	0	0	0	10	0.402	0.731
18	<i>Orostachys spinosa</i>	208.8	72	180	122.4	2.8	-0.003	0.256
19	<i>Oxytropis sylvestris</i>	190.9	243.8	197.8	46	0	-0.287	0.031
20	<i>Potentilla bifurca</i>	0	0	0	0	31.5	0.265	0.94
21	<i>Potentilla tanacetifolia</i>	2.2	2	0	1.1	0	-0.08	0.846
22	<i>Pilotrichum sibiricum</i>	11.9	0.3	0.1	6.4	5.8	0.146	0.543
23	<i>Pulsatilla ambigua</i>	130.5	109.5	124.5	85.5	0	-0.281	0.219
24	<i>Sanguisorba officinalis</i>	70.3	3.7	85.1	0	0	-0.075	0.448
25	<i>Thymus serpillum</i>	33	78.1	85.8	23.1	0	-0.146	0.583

Table 2. Correlation analysis between plant biodiversity index and ant mounds on scale of 5 m × 5 m

Таблица 2. Корреляционный анализ между индексом биоразнообразия растений и муравейниками в масштабе 5 м × 5 м

Plant biodiversity	Quadrat number					Correlation coefficient	P value
	1	2	3	4	5		
Shannon-Wiener	2.162	2.207	2.174	2.271	1.973	-0.8	0.107
Simpson	0.841	0.87	0.847	0.871	0.825	-0.68	0.21

Table 3. Coefficients of regression model ($R^2 = 0.358$)

Таблица 3. Коэффициенты регрессионной модели ($R^2 = 0,358$)

Modeling	Regression coefficients	Standard deviation	Standard coefficient	T value	P value
Constant	1.829	0.306	—	5.984	0
<i>O.spinosa</i>	0.019	0.013	0.114	1.481	0.141
<i>C.daurica</i>	0.179	0.115	0.219	1.563	0.121
<i>P.ambigua</i>	-0.063	0.039	-0.125	-1.605	0.111
<i>C.squarrosa</i>	-0.703	0.386	-0.154	-1.822	0.071
<i>A.commutata</i>	0.047	0.025	0.174	1.906	0.059
<i>A.frigida</i>	0.06	0.027	0.392	2.179	0.031
<i>O.sylvestris</i>	-0.062	0.026	-0.238	-2.396	0.018
<i>C.duriuscula</i>	-0.063	0.018	-0.297	-3.403	0.001

Among them, the biomass of *Artemisia frigida* was positively related to the number of ant mounds. We suggested three possible reasons. First, the special properties of *Artemisia frigida* make it more attractive to more insects [17], providing sufficient food source for the bright black ant. Second, the root structure of *Artemisia frigida* stabilizes the rhizosphere soil ecosystem [18] which may be suitable for ants' living. Third, there may be a mutually beneficial relationship between *Artemisia frigida* and the bright black ant. The seed surface of some plants is covered with a nutritional part that attracts ants – oleosome [4]. *Artemisia frigida* may also provide nutrition for ants through other specific structures. Ants will in return protect the plants in the way of preventing or reducing from feeding and destruction of plants by other herbivores except honeydew insects. Such properties of *Artemisia frigida* may explain for the fact that the number of ant mounds was positively correlated with the total biomass of *Artemisia frigida* [19].

In addition, the individual total biomass of *Carex duriuscula* and *Oxytropis sylvestris* was negatively related to the number of ant mounds nearby. This phenomenon could be explained by the unfavorable properties of these two plants in forming a reciprocal symbiosis relationship with the bright black ant. According to the existing re-

search, the bright black ant has reached nutritional symbiosis with Homoptera. The ants collect nectar from Homoptera, which is the nutrients excreted by Homoptera [20]. However, the covering villi of *Oxytropis sylvestris* which help resist insects and low temperature can reduce palatability [21]. Meanwhile *Oxytropis sylvestris* contains a variety of toxic alkaloids [22], making it not attractive to Homoptera insects. Therefore, this could be the reason for the finding that the nest distribution of bright black ants was individually negatively related to these two plants.

Conclusion

There is little research on the relationship between the spatial pattern of ant mound and plants. Thus, our research provides a different research idea for the interaction of animals and plants. Future research can increase the amount or coverage of quadrats or cover more plant species. Considering scale effect [23], it is necessary to investigate the spatial pattern distribution of ant nest on different scales, given this study is only based on the scale of 5 m × 5 m. Given that more information is obtained and considered, we could make one step further to build a bond between biological resources and tectonic motion, thus investigating how the unique ecosystem Baikal Lake evolved.

References

1. Petal J. *The role of ants in ecosystems*. In: Brian MV (eds.). *Production ecology of ants and termites*. Cambridge: Cambridge University Press; 1978. p.293–325.
2. Wu H, Lu X, Wu D, Song L, Yan X, Liu J. Ant mounds alter spatial and temporal patterns of CO₂, CH₄ and N₂O emissions from a marsh soil. *Soil Biology and Biochemistry*. 2013;57:884–891. <https://doi.org/10.1016/j.soilbio.2012.10.034>
3. Wu H, Batzer DP, Yan X, Lu X, Wu D. Contributions of ant mounds to soil carbon and nitrogen pools in a marsh wetland of Northeastern China. *Applied Soil Ecology*. 2013;70:9–15. <https://doi.org/10.1016/j.apsoil.2013.04.004>
4. Zhang Z. *Study on mutualism of ants with Codariocalyx motorius*. Chongqing: Southwest Agricultural University; 2001. 145 p. (In Chinese)
5. Underwood EC, Fisher BL. The role of ants in conservation monitoring: if, when, and how. *Biological Conservation*. 2006;132(2):166–182. <https://doi.org/10.1016/j.biocon.2006.03.022>
6. Andersen AN, Hoffmann BD, Müller WJ, Griffiths AD. Using ants as bioindicators in land management: simplifying assessment of ant community responses. *Journal of Applied Ecology*. 2002;39(1):8–17. <https://doi.org/10.1046/j.1365-2664.2002.00704.x>
7. Wang S, Wang H, Li J. Distribution characteristics of ant mounds and correlating factors across different succession stages of tropical forests in Xishuangbanna. *Biodiversity Science*. 2016;24(8):916–921. (In Chinese) <https://doi.org/10.17520/biods.2016088>
8. Wang R, Zhai B, Sun X. Spatio-temporal dynamics of the first generation larvae of *Laodelphax striatellus* Fallén in wheat field. *Acta Ecologica Sinica*. 2007;27(11):4536–4546. (In Chinese) <https://doi.org/10.3321/j.issn:1000-0933.2007.11.020>
9. Zhang J. *Quantitative Ecology*. Beijing: Science Press; 2011. 372 p. (In Chinese)
10. Liu T, Yue Y, Li G, Wu Y, Lv J. Studies on spatial point pattern of three typical communities in lowland between dunes of Hunshandake sandy land. *Journal of Inner Mongolia Forestry Science and Technology*. 2019;45(2):16–21. (In Chinese) <https://doi.org/10.3969/j.issn.1007-4066.2019.02.004>
11. Ripley BD. The second-order analysis of stationary point processes. *Journal of Applied Probability*. 1976;13(2):255–266. <https://doi.org/10.2307/3212829>
12. Baddeley A, Turner R. Spatstat: an R package for analyzing spatial point patterns. *Journal of Statistical Software*. 2005;12(6):1–42. <https://doi.org/10.18637/jss.v012.i06>



13. Pan L, Kwong S, Liu Y, Zhang X, Yang X, Shan D, et al. Tree competition, spatial pattern, and regeneration of a Mongolian pine natural forest in the southern geographical edge. *Acta Ecologica Sinica*. 2019;39(10):3687–3699. (In Chinese) <https://doi.org/10.5846/stxb201804270955>
14. Robinson A. Randomization, bootstrap and Monte Carlo methods in biology. *Journal of The Royal Statistical Society Series A-statistics in Society*. 2007;170(3):856. https://doi.org/10.1111/j.1467-985X.2007.00485_5.x
15. Wang P, Li F, Yang Q, Wang F. Point pattern analysis of spatial distribution of ragweed population in Jiangxi Province based on Ripley's K function and Taylor's power law. *Journal of Plant Protection*. 2019;46(1):130–135. (In Chinese) <https://doi.org/10.13802/j.cnki.zwbhxb.2019.2019916>
16. Wang X, An S. The preliminary study on grassland restoration guidance by spearman rank correlation coefficient. *Proceedings of Chinese Grassland Society 2013 Annual Conference*. 2013;10:221–230. (In Chinese)
17. Yu F. *Vegetation growth based on MODIS and the relationship between vegetation and grasshoppers of Grasshoppers Plague Areas in Aletai*. Urumqi: Xinjiang Normal University; 2008. 47 p. (In Chinese)
18. Zang X, Zhang H, Wang X, Ma Y, Bao T, Zhang R, et al. Effects of grazing on microbial community structure diversity in rhizosphere soil of *Artemisia frigida*. *Acta Agrestia Sinica*. 2017;25(5):982–992. (In Chinese) <https://doi.org/10.11733/j.issn.1007-0435.2017.05.011>
19. Zhang S, Zhang Y, Ma K. A review of protective ant-plant interaction and its mediation mechanism. *Chinese Journal of Plant Ecology*. 2010;34(11):1344–1353. (In Chinese) <https://doi.org/10.3773/j.issn.1005-264x.2010.11.012>
20. Novgorodova TA. Organization of honeydew collection by foragers of different species of ants (Hymenoptera: Formicidae): effect of colony size and species specificity. *European Journal of Entomology*. 2015;112(4):688–697. <https://doi.org/10.14411/eje.2015.077>
21. Zhao M, Sun M, Ding Q, Yu Y. Comparison on the fine apparent characteristics of four species of *Oxytropis* in Qinghai. *Grassland and Turf*. 2017;37(3):68–74. (In Chinese) <https://doi.org/10.3969/j.issn.1009-5500.2017.03.011>
22. Tan C, Liu L, Hu B, Tang H, Zhao B. Alkaloids from poisonous plant *Oxytropis Ochrocephala*. *Progress in Veterinary Medicine*. 2015;36(8):71–73. (In Chinese) <https://doi.org/10.16437/j.cnki.1007-5038.2015.08.015>
23. Chase JM. Spatial scale resolves the niche versus neutral theory debate. *Journal of Vegetation Science*. 2014;25(2):319–322. <https://doi.org/10.1111/jvs.12159>

Библиографический список

1. Petal J. The role of ants in ecosystems // Production ecology of ants and termites / eds. M.V. Brian. Cambridge: Cambridge University Press, 1978. P. 293–325.
2. Wu H., Lu X., Wu D., Song L., Yan X., Liu J. Ant mounds alter spatial and temporal patterns of CO₂, CH₄ and N₂O emissions from a marsh soil // *Soil Biology and Biochemistry*. 2013. Vol. 57. P. 884–891. <https://doi.org/10.1016/j.soilbio.2012.10.034>
3. Wu H., Batzer D.P., Yan X., Lu X., Wu D. Contributions of ant mounds to soil carbon and nitrogen pools in a marsh wetland of Northeastern China // *Applied Soil Ecology*. 2013. Vol. 70. P. 9–15. <https://doi.org/10.1016/j.apsoil.2013.04.004>
4. Zhang Z. Study on mutualism of ants with *Codariocalyx motorius*. Chongqing: Southwest Agricultural University, 2001. 145 p.
5. Underwood E.C., Fisher B.L. The role of ants in conservation monitoring: if, when, and how // *Biological Conservation*. 2006. Vol. 132. Iss. 2. P. 166–182. <https://doi.org/10.1016/j.biocon.2006.03.022>
6. Andersen A.N., Hoffmann B.D., Müller W.J., Griffiths A.D. Using ants as bioindicators in land management: simplifying assessment of ant community responses // *Journal of Applied Ecology*. 2002. Vol. 39. Iss. 1. P. 8–17. <https://doi.org/10.1046/j.1365-2664.2002.00704.x>
7. Wang S., Wang H., Li J. Distribution characteristics of ant mounds and correlating factors across different succession stages of tropical forests in Xishuangbanna // *Biodiversity Science*. 2016. Vol. 24. Iss. 8. P. 916–921. <https://doi.org/10.17520/biods.2016088>
8. Wang R., Zhai B., Sun X. Spatio-temporal dynamics of the first generation larvae of *Laodelphax striatellus* Fallén in wheat field // *Acta Ecologica Sinica*. 2007. Vol. 27. Iss. 11. P. 4536–4546. <https://doi.org/10.3321/j.issn:1000-0933.2007.11.020>
9. Zhang J. *Quantitative Ecology*. Beijing: Science Press, 2011. 372 p.
10. Liu T., Yue Y., Li G., Wu Y., Lv J. Studies on spatial point pattern of three typical communities in lowland between dunes of Hunshandake sandy land // *Journal of Inner Mongolia Forestry Science and Technology*. 2019. Vol. 45. Iss. 2. P. 16–21. <https://doi.org/10.3969/j.issn.1007-4066.2019.02.004>
11. Ripley B.D. The second-order analysis of stationary point processes // *Journal of Applied Probability*. 1976. Vol. 13. Iss. 2. P. 255–266. <https://doi.org/10.2307/3212829>
12. Baddeley A., Turner R. Spatstat: an R package for analyzing spatial point patterns // *Journal of Statistical Software*. 2005. Vol. 12. Iss. 6. P. 1–42. <https://doi.org/10.18637/jss.v012.i06>
13. Pan L., Kwong S., Liu Y., Zhang X., Yang X., Shan D., et al. Tree competition, spatial pattern, and regeneration of a Mongolian pine natural forest in the southern geographical edge // *Acta Ecologica Sinica*. 2019. Vol. 39. Iss. 10. P. 3687–3699. <https://doi.org/10.5846/stxb201804270955>
14. Robinson A. Randomization, bootstrap and Monte Carlo methods in biology // *Journal of The Royal Statistical Society Series A-statistics in Society*. 2007. Vol. 170. Iss. 3. P. 856. https://doi.org/10.1111/j.1467-985X.2007.00485_5.x
15. Wang P., Li F., Yang Q., Wang F. Point pattern analysis of spatial distribution of ragweed population in Jiangxi Province based on Ripley's K function and Taylor's power law // *Journal of Plant Protection*. 2019. Vol. 46. Iss. 1. P. 130–135. <https://doi.org/10.13802/j.cnki.zwbhxb.2019.2019916>
16. Wang X., An S. The preliminary study on grassland restoration guidance by spearman rank correlation



coefficient // Proceedings of Chinese Grassland Society 2013 Annual Conference. 2013. Vol. 10. P. 221–230.

17. Yu F. Vegetation growth based on MODIS and the relationship between vegetation and grasshoppers of Grasshoppers Plague Areas in Aletai. Urumqi: Xinjiang Normal University, 2008. 47 p.

18. Zang X., Zhang H., Wang X., Ma Y., Bao T., Zhang R., et al. Effects of grazing on microbial community structure diversity in rhizosphere soil of *Artemisia frigida* // Acta Agrestia Sinica. 2017. Vol. 25. Iss. 5. P. 982–992. <https://doi.org/10.11733/j.issn.1007-0435.2017.05.011>

19. Zhang S., Zhang Y., Ma K. A review of protective ant-plant interaction and its mediation mechanism // Chinese Journal of Plant Ecology. 2010. Vol. 34. Iss. 11. P. 1344–1353. <https://doi.org/10.3773/j.issn.1005-264x.2010.11.012>

20. Novgorodova T.A. Organization of honeydew col-

lection by foragers of different species of ants (Hymenoptera: Formicidae): effect of colony size and species specificity // European Journal of Entomology. 2015. Vol. 112. Iss. 4. P. 688–697. <https://doi.org/10.14411/eje.2015.077>

21. Zhao M., Sun M., Ding Q., Yu Y. Comparison on the fine apparent characteristics of four species of *Oxytropis* in Qinghai // Grassland and Turf. 2017. Vol. 37. Iss. 3. P. 68–74. <https://doi.org/10.3969/j.issn.1009-5500.2017.03.011>

22. Tan C., Liu L., Hu B., Tang H., Zhao B. Alkaloids from poisonous plant *Oxytropis Ochrocephala* // Progress in Veterinary Medicine. 2015. Vol. 36. Iss. 8. P. 71–73. <https://doi.org/10.16437/j.cnki.1007-5038.2015.08.015>

23. Chase J.M. Spatial scale resolves the niche versus neutral theory debate // Journal of Vegetation Science. 2014. Vol. 25. Iss. 2. P. 319–322. <https://doi.org/10.1111/jvs.12159>

Authorship criteria / Критерии авторства

Xu Wang, Qingxi Hu, Weizheng Kong, Chenyang Zhang, Shan Jia, Yuan Chang, Wei Deng, Andrey V. lishtva, Victor G. Shilenkov, Zhongqiu Li, Xingjun Tian are the authors of the article, hold equal copyright and bear equal responsibility for plagiarism.

Ван Сюй, Ху Цинси, Кон Вэйчжэн, Чжан Чэнъян, Цзя Шань, Чан Юань, Дэн Вэй, Лиштва А.В., Шиленков В.Г., Ли Чжунцю, Тянь Синцюнь написали статью, имеют равные авторские права и несут одинаковую ответственность за плагиат.

Responsibility for plagiarism / Конфликт интересов

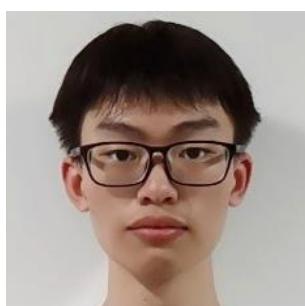
The authors declare that there is no conflict of interest regarding the publication of this article.

Авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов.

All authors have read and approved the final version of this manuscript.

Все авторы прочитали и одобрили окончательный вариант рукописи.

Information about the authors / Сведения об авторах



Xu Wang,
Student,
School of Life Science,
Nanjing University,
163 Xianlin Ave, Nanjing 210023, China,
e-mail: 171850537@mail.nju.edu.cn

Ван Сюй,
студент,
Школа естественных наук,
Нанкинский университет,
210023, г. Нанкин, просп. Сянълинь, 163, Китай,
e-mail: 171850537@mail.nju.edu.cn



Qingxi Hu,
Student,
School of Life Science,
Nanjing University,
163 Xianlin Ave, Nanjing 210023, China,
e-mail: hqx.nju@foxmail.com

Ху Цинси,
студентка,
Школа естественных наук,
Нанкинский университет,
210023, г. Нанкин, просп. Сянълинь, 163, Китай,
e-mail: hqx.nju@foxmail.com



Weizheng Kong,
Student,
School of Life Science,
Nanjing University,
163 Xianlin Ave, Nanjing 210023, China,
e-mail: lyevkong@163.com

Кун Вэйчжэн,
студент,
Школа естественных наук,
Нанкинский университет,
210023, г. Нанкин, просп. Сянълинь, 163, Китай,
e-mail: lyevkong@163.com



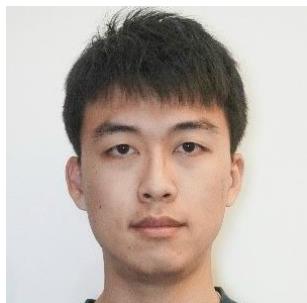
Chenyang Zhang,
Student,
School of Life Science,
Nanjing University,
163 Xianlin Ave, Nanjing 210023, China,
e-mail: 1524892891@qq.com

Чжан Чэнъян,
студентка,
Школа естественных наук,
Нанкинский университет,
210023, г. Нанкин, просп. Сянълинь, 163, Китай,
e-mail: 1524892891@qq.com



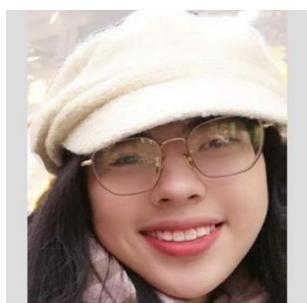
Shan Jia,
Student,
School of Life Science,
Nanjing University,
163 Xianlin Ave, Nanjing 210023, China,
e-mail: 1160263491@qq.com

Цзя Шань,
студентка,
Школа естественных наук,
Нанкинский университет,
210023, г. Нанкин, просп. Сянълинь, 163, Китай,
e-mail: 1160263491@qq.com



Yuan Chang,
Student,
School of Life Science,
Nanjing University,
163 Xianlin Ave, Nanjing 210023, China,
e-mail: cy_kn@foxmail.com

Чан Юань,
студент,
Школа естественных наук,
Нанкинский университет,
210023, г. Нанкин, просп. Сянълинь, 163, Китай,
e-mail: cy_kn@foxmail.com



Wei Deng,
Student,
School of Life Science,
Nanjing University,
163 Xianlin Ave, Nanjing 210023, China,
e-mail: 171850064@smail.nju.edu.cn

Дэн Вэй,
студентка,
Школа естественных наук,
Нанкинский университет,
210023, г. Нанкин, просп. Сянълинь, 163, Китай,
e-mail: 171850064@smail.nju.edu.cn



Andrey V. lishtva,
Cand. Sci. (Biol.), Associate Professor,
Head of the Department of Botany,
Irkutsk State University,
1 Karl Marx St., Irkutsk 664003, Russia,
e-mail: lishtva@rambler.ru

Лиштва Андрей Владимирович,
кандидат биологических наук, доцент,
заведующий кафедрой ботаники,
Иркутский государственный университет,
664003, г. Иркутск, ул. Карла Маркса, 1, Россия,
e-mail: lishtva@rambler.ru



Victor G. Shilenkov,
Cand. Sci. (Biol.), Associate Professor,
Department of Hydrobiology and Invertebrate Zoology,
Irkutsk State University,
1 Karl Marx St., Irkutsk 664003, Russia,
e-mail: vgshilenkov@gmail.com

Шиленков Виктор Георгиевич,
кандидат биологических наук, доцент,
доцент кафедры гидробиологии и зоологии беспозвоночных,
Иркутский государственный университет,
664003, г. Иркутск, ул. Карла Маркса, 1, Россия,
e-mail: vgshilenkov@gmail.com



Zhongqiu Li,
Associate Professor,
School of Life Science,
Nanjing University,
163 Xianlin Ave, Nanjing 210023, China,
✉ e-mail: lizq@nju.edu.cn

Ли Чжунцю,
доцент,
Школа естественных наук,
Нанкинский университет,
210023, г. Нанкин, просп. Сянълинь, 163, Китай,
✉ e-mail: lizq@nju.edu.cn



Xingjun Tian,
Professor,
School of Life Science,
Nanjing University,
163 Xianlin Ave, Nanjing 210023, China,
✉ e-mail: tianxj@nju.edu.cn

Тянь Синзюнь,
профессор,
Школа естественных наук,
Нанкинский университет,
210023, г. Нанкин, просп. Сянълинь, 163, Китай,
✉ e-mail: tianxj@nju.edu.cn



Уважаемые авторы!

Требования к оформлению научных статей, изложенные ниже, разработаны редакцией журнала для того, чтобы помочь Вам предоставить все необходимые для публикации сведения и избежать наиболее распространенных ошибок.

1. Научный журнал «Науки о Земле и недропользование» принимает к публикации научные материалы в виде статей по следующим тематикам:

- геологическое строение месторождений полезных ископаемых;
- тектоника месторождений, рудных узлов, районов;
- минералогия и геохимия месторождений полезных ископаемых;
- генетические проблемы формирования месторождений полезных ископаемых и других геологических объектов;
- минерагения (металлогения): рудные зоны, районы, пояса, металлогенические карты;
- методы и методики поисков и разведки месторождений полезных ископаемых;
- экономическая оценка месторождений полезных ископаемых, правовые основы недропользования;
- физико-геологические модели месторождений полезных ископаемых;
- геоинформационные технологии в науках о Земле;
- технология и техника горно-буровых работ;
- технология и техника разработки месторождений полезных ископаемых;
- технология обогащения и переработки минерального сырья;
- геммология и технология художественной обработки минералов и горных пород;
- гидрогеология и инженерная геология;
- безопасность жизнедеятельности в горно-геологической отрасли;
- геоэкология.

2. Приоритетными для публикации являются статьи в области междисциплинарных и мультидисциплинарных исследований, а также результаты работ с использованием цифровых технологий.

3. Статьи принимаются на русском, английском, китайском и монгольском языках от авторов, работающих в российских и иностранных вузах, академических и отраслевых научно-исследовательских институтах, а также производственных горно-геологических организаций.

4. Статья сопровождается:

- электронными версиями всех документов (скан), в том числе:
авторского заявления, заполненного и подписанного всеми соавторами статьи;
авторского договора;
акта экспертного заключения о возможности открытой публикации материалов;
сведений обо всех авторах на русском и английском языках с указанием названия вуза, организации, учреждения, должности и структурного подразделения, наличия ученой степени, ученого звания, почтового и электронного адресов каждого автора статьи;
- цветными портретными фотографиями авторов на светлом фоне (деловой стиль) в хорошем качестве в формате *.JPEG;
- по желанию автора в статье могут быть указаны его профили в системах цитирования и другие сведения (профили в РИНЦ, ORCID, Scopus, в других системах цитирования, можно предоставить ссылку на личную страницу в Интернете, включая страницы в социальных сетях).

Обращаем Ваше внимание, что вся перечисленная выше информация публикуется в журнале в открытом доступе!

5. Статьи принимаются ответственным секретарем в электронном виде в формате Microsoft Word для Windows по электронной почте nzn@istu.edu. Шрифт – Times New Roman, размер шрифта – 12 (строки через 1 интервал), перенос слов – автоматический. Параметры страницы:



отступы сверху и снизу – 2,5 см, слева и справа – 2 см, абзацный отступ – 0,6 см, ориентация страницы – книжная.

6. Объем текста – от 10000 знаков, включая пробелы, иллюстрационный материал – до 6 рисунков.

7. Статьи должны быть структурированы и выполнены по международному стандарту IMRAD. Структура статьи: индекс УДК, название статьи, фамилия, имя, отчество авторов, название учреждения, где выполнена работа, аннотация и ключевые слова на языке оригинала (русском / китайском / монгольском) и английском языках, введение, цель исследования, материал и методы исследования, результаты исследования и их обсуждение, выводы или заключение, библиографический список и references, критерии авторства, конфликт интересов и сведения об авторах (вся информация предоставляется одним файлом, названным следующим образом: *Фамилия первого автора – Первые три-четыре слова названия.doc*).

8. Рекомендуемая длина названия статьи – до 100 знаков с пробелами. Название статьи должно быть лишено сокращений, аббревиатур, описывать содержание статьи точно и конкретно, при этом оно должно быть достаточно длинным, чтобы однозначно выразить главную идею статьи, и коротким настолько, чтобы ни одно слово нельзя было выбросить без потери смысла.

9. Аннотация должна отражать основную идею статьи, поскольку для большинства читателей она является главным источником информации о представленном исследовании. Объем аннотации – 1500–2000 знаков, примерная структура: цель, методы, предмет, объект и результаты исследования, выводы. Не следует ссылаться на таблицы и / или рисунки, приведенные в основном в тексте статьи, а также использованную литературу, поскольку аннотации также публикуются отдельно от статьи. Не используйте в аннотации сокращения, аббревиатуры, а также формулы, так как аннотации в большинстве баз данных, начиная с РИНЦ, публикуются в формате, исключающем отображение формул.

Ключевые слова должны отражать суть исследования, способствовать работе поисковых систем, по количеству не превышать 10 единиц, словосочетания – не более 3 единиц.

10. Формулы в тексте должны быть набраны в специальном редакторе формул. Все экспликации элементов формул необходимо также выполнять в редакторе формул.

11. Таблицы должны содержать только необходимые данные и представлять собой обобщенные и статистически обработанные материалы с указанием обозначения переменных. Каждая таблица снабжается заголовком. Формат таблиц – книжный, направление шрифта – по горизонтали.

12. Графические материалы к статье (рисунки и фотографии) представляются в минимальном количестве (не более 6 единиц) и должны быть выполнены в соответствии с требованиями к геологической графике. Выбирается масштаб, пригодный для тиражирования, а размер – не более 170×245 мм. Графические материалы должны допускать перемещение в тексте и возможность изменения размеров. Каждый рисунок сопровождается надписями в содержательной части и подрисуночной подписью, в которой представляется объяснение всех его элементов. Названия рисунков и подрисуночные подписи должны быть максимально краткие, основная информация предоставляется в тексте.

13. Ссылки на литературные источники приводятся в квадратных скобках в порядке возрастания. Библиографический список формируется по мере упоминания источников в тексте. Рекомендуемое количество источников в библиографическом списке – не менее 20, из них не менее 5 ссылок на статьи из иностранных журналов. При этом самоцитирование автора не должно превышать 25 % от общего количества источников и полностью исключается самоцитирование журнала. Не допускаются ссылки на законы, государственные стандарты, положения, диссертации и авторефераты, учебники и учебные пособия, справочники, словари и энциклопедии, а также геологические карты. При необходимости обращения к этим источникам ссылку на них



следует размещать в подстрочной сноске. Редакционная коллегия рекомендует в списке литературы ссылаться на статьи из журналов, входящих в международные базы данных по глобальным индексам цитирования (Scopus, Web of Science и другие).

14. Список литературы составляется в двух вариантах. В библиографическом описании статьи необходимо указывать всех авторов. Первый вариант (библиографический список) оформляется на языке источника в соответствии с ГОСТ Р 7.0.5 2008. Второй вариант (references) оформляется в виде транслитерации русского текста в латиницу с переводом на английский язык и служит для отслеживания цитируемости авторов. Примеры оформления источников в списках можно посмотреть на нашем сайте в разделе «Требования к статьям».

15. При подаче статьи авторами предоставляются на английском языке следующие элементы работы: название статьи, сведения об авторах, аннотация, ключевые слова, благодарности, названия таблиц и подрисуночные подписи, библиография.

16. Авторы статей должны придерживаться обязанностей, предусмотренных «Редакционной политикой журнала».

17. Редакция оставляет за собой право отклонять статьи, не отвечающие указанным требованиям. Поступающие в редакцию материалы возврату не подлежат.

18. Редакция оставляет за собой право на научное и литературное редактирование статей с последующим согласованием с авторами.

19. Представленные статьи проходят проверку на наличие заимствований.

20. Журнал выпускается с периодичностью 4 номера в год.

Внимание! Публикация статей является бесплатной.

Мы приглашаем Вас к участию в нашем проекте в качестве авторов, рекламодателей и читателей.

По вопросам публикации обращаться по адресу: 664074, Россия, г. Иркутск, ул. Лермонтова, 83, Иркутский национальный исследовательский технический университет, редколлегия, ауд. Е-317.

Главный редактор Лобацкая Раиса Моисеевна, тел.: +7 (3952) 405115, e-mail: lobatskaya@gmail.com

Заместитель главного редактора Аузина Лариса Ивановна, тел.: +7 (3952) 405108, e-mail: lauzina@mail.ru

Заместитель главного редактора Красноштанов Сергей Юрьевич, тел.: +7 (3952) 405101, e-mail: geo_info@istu.edu

Статьи следует направлять ответственному секретарю Храмовских Виталию Александровичу, тел.: +7 (3952) 405069, e-mail: nzn@istu.edu, адрес: 664074, Россия, г. Иркутск, ул. Лермонтова, 83, ауд. Ж-04.



Образец оформления статьи

УДК 549.09

Минералого-технологические типы руд Томинского месторождения меди (Южный Урал)

© Е.М. Курчевская^a, М.В. Яхно^b, А.Е. Сенченко^c^{a,c}НИИиПИ «Технологии обогащения минерального сырья», г. Иркутск, Россия^bИркутский национальный исследовательский технический университет, г. Иркутск, Россия

Резюме: Цель. Цель данного исследования заключается в изучении технологических типов руд Томинского месторождения меди, а также минерального состава вмещающих пород и руд каждого из трех типов, выявлении минералогических и структурно-текстурных особенностей руд, выявлении взаимосвязи изменения рудной минерализации и степени метаморфизма для каждого типа руд. **Методы.** Рудные тела Томинского медно-порфирового месторождения, залегающие в диоритах и кварцевых диоритах, представляют собой прожилковые и прожилково-вкрапленные скопления в зонах дробления. На месторождении широко развиты метасоматиты кварц-серицитовой формации. Изучение типов руд проводилось с использованием микроскопов. **Результаты.** В результате выделено три геолого-технологических типа руд в пределах Томинского месторождения. Первый тип представлен первичными сульфидными рудами, которые наблюдаются в среднем ниже глубины 50–55 м. По составу это хлорит-мусковит-кварцевые метасоматиты. Вмещающие породы представлены серицитизированными, хлоритизированными и карбонатизированными диоритами. В составе руд преобладают халькопирит и пирит. Практически вся медь содержится в халькопирите. Второй тип – это рудные зоны вторичного сульфидного обогащения. Этот тип сложен первичными и вторичными сульфидами меди. Все породы аргиллизированные и представлены метасоматитами различного состава. Все виды пород несут в себе рудную минерализацию. К третьему типу относятся окисленные руды, которые образуют зону окисления месторождения. Они делятся на три подтипа: глинистые, глинисто-щебнистые и щебнистые руды. Глинистые руды залегают в самых верхних частях коры выветривания, глинисто-щебнистые руды слагают центральную ее часть, а руды в щебнистых образованиях отмечены в нижних горизонтах. Представлено петрографическое описание каждого из типов. Выявлены минералогические и структурно-текстурные особенности руд. В результате изучения петрографического состава каждого типа руд установлена различная степень метаморфизма и вследствие этого – изменение рудной минерализации. **Выводы.** Прослеживается влияние метасоматических процессов, изменивших строение и минеральный состав руд. Для первого типа руды характерно наличие первичных пород – диоритов с насыщенной сульфидной вкрапленностью и с незначительными метасоматическими изменениями. В зоне вторичного обогащения породы претерпели интенсивное метасоматическое изменение. Породы этой зоны насыщены гидроксидами железа. Для зоны интенсивного выветривания характерны глинистые и хлоритизированные породы. Рудная минерализация представлена исключительно окисленными минералами. Сульфиды единичны. Различия в минеральном составе трех типов руд влияют на выбор способов переработки руды в пределах Томинского месторождения.

Ключевые слова: Томинское месторождение, медно-порфировое оруденение, метаморфизм, технологические типы руд

Благодарности:

Mineralogical and technological types of Tominskoye deposit copper ores (Southern Ural)

© Elena M. Kurchevskaya^a, Marina V. Yakhno^b, Arkady Y. Senchenko^c^{a,c}NIPI TOMS (Scientific Research and Design Institute “Technologies of Minerals Separation”), Irkutsk, Russia^bIrkutsk National Research Technical University, Irkutsk, Russia

Abstract: Purpose. The purpose of the article is investigation of the technological types of Tominskoe copper deposit ores; examination of the mineral composition of the host rocks and ores of each of the three types; identification of mineralogical and structural-textural features of ores, research of the relationship of mineralization and metamorphism intensity alteration for each type of ore. **Methods.** Ore bodies of the Tominskoye porphyry copper deposit occurring in the diorites and quartz diorites are veinlet and porphyry-stringer clusters in crush zones. The deposit is characterized with the predominant metasomatic rocks of quartz-sericite formation. **Results.** Three geological and technological ore types are distinguished within the Tominskoye field. The first type is represented by primary sulfide ores, which occur on average lower than 50–55 m depth. By composition they are chlorite-muscovite-quartz metasomatic rocks. The host rocks are repre-



sented by sericitized, chloritized and carbonated diorites. Chalcopyrite and pyrite are predominant elements in ore composition. Chalcopyrite contains carbonated diorites. Chalcopyrite and pyrite are predominant elements in ore composition. Chalcopyrite contains almost all of the copper. The second type includes the ore zones of secondary sulfide concentration. This type is composed of primary and secondary copper sulfides. All the rocks are dirty argillaceous and are represented by metasomatic rocks of different composition. All types of rocks feature ore mineralization. The third type covers oxidized ores, which form the oxidation zone of the deposit. They are divided into three subtypes: clay, claydetrital and detrital ores. Clay ores occur in the uppermost parts of the crust of weathering. Clay-detrital ores compose its central part, while ores in detrital formations have been found in the lower horizons. Each of the type is given a petrographic description. Mineralogical and structural-textural features of ores are identified. The study of the petrographic composition of each type of ores showed a varying degree of metamorphism that resulted in changes in ore mineralization. **Conclusions.** The influence of metasomatic processes is indicated. The last have changed the structure and mineral composition of ores. The presence of primary rocks – diorites with saturated sulfide impregnation and insignificant metasomatic alterations is typical for the first type of ore. The rocks in the zone of secondary concentration have undergone intense metasomatic alteration. These rocks are saturated with iron hydroxides. The presence of clay and chloritized rocks characterize the zone of intense weathering. Ore mineralization is represented exclusively by oxidized minerals. Sulfides are rare. Variations in the mineral composition of the three types of ores influence the choice of ore processing methods at Tominskoye ore deposit.

Keywords: Tominskoye field, porphyry copper mineralization, metamorphism, technological ore types

Acknowledgements:

Далее идут **текст статьи** (в виде: введение, цель исследования, материалы и методы исследования, результаты исследования и их обсуждение, заключение), **библиографический список** (references), **критерии авторства** (authorhip criteria) и **конфликт интересов** (conflict of interests).

Сведения об авторах / Information about the authors

Фото
автора

Курчевская Елена Михайловна,
старший научный сотрудник,
НИИПИ «Технологии обогащения минерального сырья»,
664074, г. Иркутск, ул. Лермонтова, 83а, Россия,
e-mail: kurchevskaya@tomsgroup.ru

Elena M. Kurchevskaya,
Senior Researcher,
Scientific Research and Design Institute “Technologies of Minerals Separation”,
83a Lermontov St., Irkutsk 664074, Russia,
e-mail: kurchevskaya@tomsgroup.ru

Фото
автора

Яхно Марина Владиславовна,
старший преподаватель кафедры геологии и геохимии полезных ископаемых,
Иркутский национальный исследовательский технический университет,
664074, г. Иркутск, ул. Лермонтова, 83, Россия,
✉ e-mail: ymar@istu.edu

Marina V. Yakhno,
Senior Lecturer of the Department of Geology and Geochemistry of Minerals,
Irkutsk National Research Technical University,
83 Lermontov St., Irkutsk 664074, Russia,
✉ e-mail: ymar@istu.edu

Фото
автора

Сенченко Аркадий Евгеньевич,
генеральный директор,
НИИПИ «Технологии обогащения минерального сырья»,
664074, г. Иркутск, ул. Лермонтова, 83а, Россия,
e-mail: senchenko@tomsgroup.ru

Arkady E. Senchenko,
CEO,
Scientific Research and Design Institute “Technologies of Minerals Separation”,
83a Lermontov St., Irkutsk 664074, Russia,
e-mail: senchenko@tomsgroup.ru

НАУКИ О ЗЕМЛЕ И НЕДРОПОЛЬЗОВАНИЕ

12+

Научный журнал

Том 43 № 3 (72) 2020

Дизайнер А.А. Хохряков
Редактор Ф.А. Посысоева
Перевод на английский язык Е.Н. Петровой
Компьютерная верстка Ф.А. Посысоевой

Издание распространяется бесплатно

Выход в свет 30.09.2020 г. Формат 60×90/8.
Бумага офсетная. Печать цифровая. Усл. печ. л. 21,75.
Тираж 500 экз. Зак. 171. Поз. плана 4н.

Отпечатано в типографии Издательства
ФГБОУ ВО «Иркутский национальный
исследовательский технический университет»,
адрес типографии: 664074, Россия, г. Иркутск, ул. Лермонтова, 83

Адрес редакции, учредителя и издателя:
ФГБОУ ВО «Иркутский национальный
исследовательский технический университет»,
664074, Россия, г. Иркутск, ул. Лермонтова, 83