

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

НАУКИ О ЗЕМЛЕ И НЕДРОПОЛЬЗОВАНИЕ

Tom 48 № 2 2025
Vol.

EARTH SCIENCES AND SUBSOIL USE

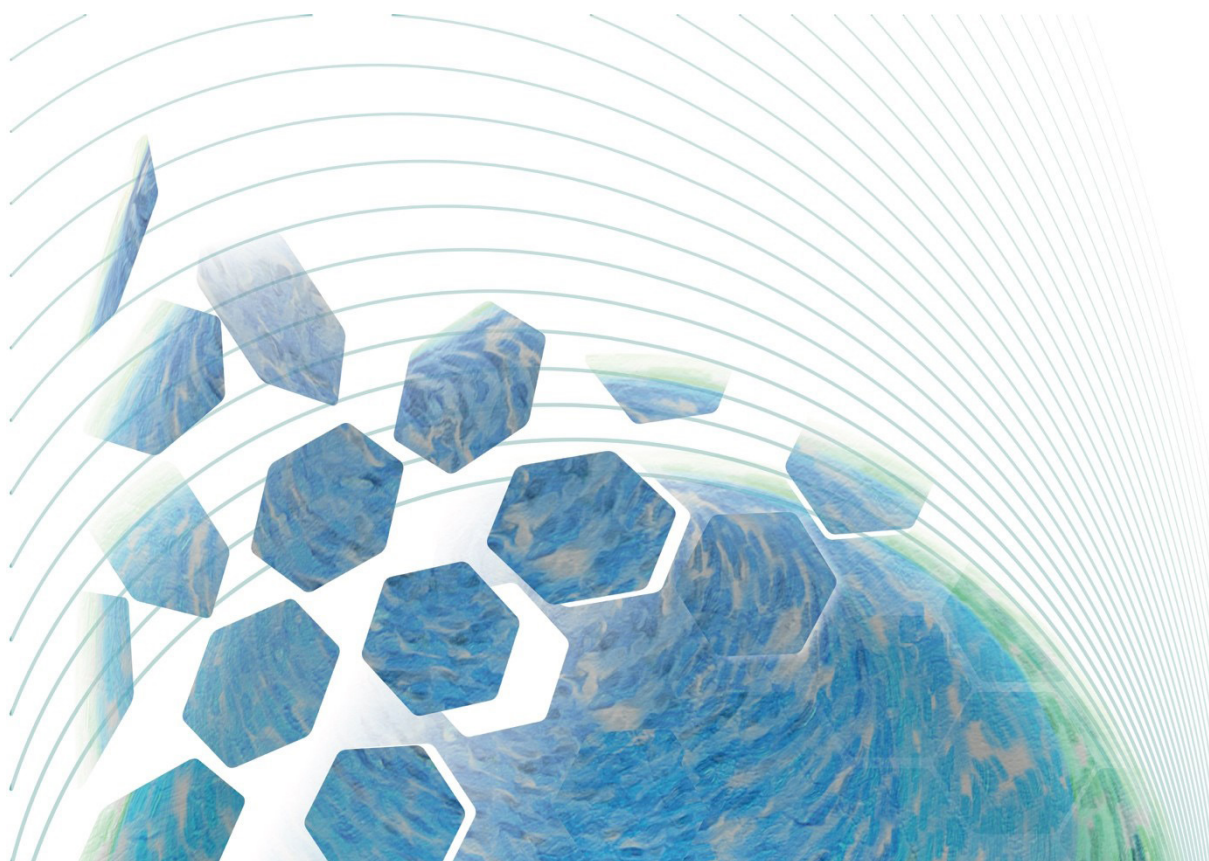
ISSN 2686-9993 (print)
ISSN 2686-7931 (online)

НАУКИ О ЗЕМЛЕ И НЕДРОПОЛЬЗОВАНИЕ

Том
Vol. 48 № 2 2025

EARTH SCIENCES AND SUBSOIL USE

NAUKI O ZEMLE
I NEDROPOL'ZOVANIE



Редакционный совет

Гладкочуб Д.П., член-корр. РАН, Институт земной коры СО РАН (Иркутск, Россия)

Скляр Е.В., член-корр. РАН, Институт земной коры СО РАН (Иркутск, Россия)

Гордиенко И.В., член-корр. РАН, Геологический институт СО РАН (Улан-Удэ, Россия)

Корняков М.В., д-р техн. наук, доцент, ректор, Иркутский национальный исследовательский технический университет (Иркутск, Россия)

Корольков А.Т., д-р геол.-минерал. наук, проф., Иркутский государственный университет (Иркутск, Россия)

Макаров В.А., д-р геол.-минерал. наук, проф., Сибирский федеральный университет (Красноярск, Россия)

Очир Гэрэл, д-р геол.-минерал. наук, проф., Монгольский университет науки и технологии (Улан-Батор, Монголия)

Тальгамер Б.Л., д-р техн. наук, проф., Иркутский национальный исследовательский технический университет (Иркутск, Россия)

Ши Гуаньхай, проф., Геммологический институт Китайского геологического университета (Пекин, Китай)

Чжао Цзюньмэн, проф., Институт изучения Тибетского плато Китайской академии наук (Пекин, Китай)

Чжан Юнчжань, доктор наук, проф., Нанкинский университет (Нанкин, Китай)

Шигин А.О., д-р техн. наук, доцент, Сибирский федеральный университет (Красноярск, Россия)

Семинский К.Ж., д-р геол.-минерал. наук, Институт земной коры СО РАН (Иркутск, Россия)

Тимофеева С.С., д-р техн. наук, проф., Иркутский национальный исследовательский технический университет (Иркутск, Россия)

Зелинская Е.В., д-р техн. наук, проф., Иркутский национальный исследовательский технический университет (Иркутск, Россия)

Морин А.С., д-р техн. наук, проф., Сибирский федеральный университет (Красноярск, Россия)

Председатель редакционного совета:

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

Редакционная коллегия

Главный редактор:

Паршин А.В., канд. геол.-минерал. наук, профессор практики, научный руководитель института «Сибирская школа геонаук», Иркутский национальный исследовательский технический университет (Иркутск, Россия)

Заместитель главного редактора:

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

Ответственный секретарь:

Долгих М.Н., Иркутский национальный исследовательский технический университет (Иркутск, Россия)

Журнал «Науки о Земле и недропользование» входит в базу данных GeoRef, 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, рассылается в Российскую книжную палату, ВИННИТИ 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 ООО «Урал-Пресс», подписной индекс в ООО «Урал-Пресс» – 41538 (адрес ООО «Урал-Пресс»: 620026, Свердловская область, г. Екатеринбург, ул. Мамина-Сибиряка, 130, Россия). 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 – ежеквартально

Журнал зарегистрирован
Федеральной службой по надзору в сфере
связи, информационных технологий
и массовых коммуникаций (Роскомнадзор)
Регистрационный номер:
ПИ № ФС77-76110 от 24 июня 2019 г.

Учредитель и издатель:

Федеральное государственное бюджетное
образовательное учреждение высшего образования
«Иркутский национальный исследовательский
технический университет» (ФГБОУ ВО «ИРНИТУ»)
Россия, 664074, г. Иркутск, ул. Лермонтова, 83

Издательство:

Федеральное государственное бюджетное
образовательное учреждение высшего образования
«Иркутский национальный исследовательский
технический университет»
Россия, 664074, г. Иркутск, ул. Лермонтова, 83А

Адрес редакции:

Россия, 664074, г. Иркутск, ул. Лермонтова, 83
e-mail: nzn@istu.edu

© ФГБОУ ВО «Иркутский национальный
исследовательский технический
университет», 2025

Editorial Council

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)

Korniyakov M.V., Dr. Sci. (Eng.), Rector, Irkutsk National Research Technical University (Irkutsk, 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, Ph.D., 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)

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

Parshin A.V., Cand. Sci. (Geol. & Mineral.), Professor, Scientific Director of the Siberian School of Geosciences, Irkutsk National Research Technical University (Irkutsk, Russia)

Deputy Editor-in-Chief

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

Executive secretary

Dolgikh M.N., Irkutsk National Research Technical University (Irkutsk, Russia)

The journal "Earth sciences and subsoil use" is included in the GeoRef database and current List of publications on the main results of candidate's and doctoral theses of the State Commission for Academic Degrees and Titles of the Russian Federation. It is also 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, OAJI (open-access databases), Ulrich's Periodicals Directory, and EBSCO database. It is distributed through the Ural-Press LLC, the subscription code in Ural-Press LLC: 41538 (the postal address of Ural-Press LLC: 130 Mamin-Sibiryak St., Yekaterinburg 620026, Russia). 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".

Publication frequency

A quarterly journal

The journal is registered by the Federal Service for Supervision of Communications, Information Technology, and Mass Media (Roskomnadzor)
Registration No.:
ПИ no. ФС77-76110 of June 24, 2019

Founder and Publisher

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

Publishing House

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

Editorial Office

83 Lermontov St., Irkutsk 664074, Russia
e-mail: nzn@istu.edu

© Federal State Budget Educational Institution of Higher Education
"Irkutsk National Research Technical University", 2025



СОДЕРЖАНИЕ

Содержание.....	132
-----------------	-----

Геоэкология

Трусова В.В., Алексеев А.С., Качор О.Л., Икрамов З.Л. Изменения эколого-геохимической обстановки в пределах объекта накопленного вреда окружающей среде – бывшего завода «Востсибэлемент» (2021–2024 гг.)	134
Гантимурова С.А., Караваева А.К., Сляднев Е.А., Чжан Ю., Янь Ю., У К. Сравнение систем управления и стратегий развития геопарков в Китае и России (на англ. яз.).....	146

Геофизика

Константинов К.М., Томшин М.Д., Константинов И.К., Попов А.Н., Поздняков В.Е., И Ш., Чжоу Ц. Палеомагнитная корреляция траппов Тунгусской синеклизы Сибирской платформы с глобальным стратотипом пермо-триаса провинции Чжэцзян Южного Китая (на англ. яз.).....	160
Мохаммед М.А. Структурное картирование и определение перспективных залежей месторождения углеводородов Отио в дельте реки Нигер (на англ. яз.).....	185
Трофимов И.В., Валькова Е.Д., Лазурченко А.В., Степанов А.П., Давыденко А.Ю. Разработка методики и оптимального комплекса геофизических исследований при выделении перспективных областей на наличие рудного золота в пределах Каспинского рудного узла	204

Горнопромышленная и нефтегазопромысловая геология, геофизика, маркшейдерское дело и геометрия недр

Сумкин А.А., Чэнь Ч., Гнатюк Я.С., Аузина Л.И., Чжан Ю. Условия формирования природных вод в долине реки Янцзы и на прилегающих территориях (Китай)	224
Белькович М.Л. Расчет компонентно-фракционного состава добываемого пластового флюида Ковыктинского месторождения.....	237
Степанова М.В., Экзарьян В.Н. Закономерности развития процесса переработки берегов равнинных водохранилищ.....	249
К сведению авторов.....	260



CONTENTS

Contents.....	133
---------------	-----

Geoecology

Trusova V.V., Alekseev A.S., Kachor O.L., Ikramov Z.L. Changes in the ecological and geochemical situation within the object of accumulated environmental damage – the former Vostsibelelement plant industrial site (2021–2024)	134
Gantimurova S.A., Karaeva A.K., Slyadnev E.A., Zhang Y., Yan Y., Wu K. Comparison of geopark management systems and development strategies in China and Russia	146

Geophysics

Konstantinov K.M., Tomshin M.D., Konstantinov I.K., Popov A.N., Pozdniakov V.E., Yi Sh., Zhou Z. Palaeomagnetic correlation of Tunguska syncline traps of Siberian platform with Permian-Triassic global stratotype of Zhejiang Province, Southern China	160
Mohammed M.A. Structural mapping and prospects identification in Otio oil field, Niger Delta	185
Trofimov I.V., Valkova E.D., Lazurchenko A.V., Stepanov A.P., Davydenko A.Yu. Development of a methodology and an optimal complex of geophysical studies when identifying ore gold promising areas within Kaspinsky ore cluster	204

Applied mining and petroleum field geology, geophysics, mine surveying and subsoil geometry

Sumkin A.A., Chen Zh., Gnatyuk I.S., Auzina I.L., Zhang Y. Formation conditions of natural waters in the Yangtze river valley and its adjacent territories, China	224
Belkovich M.L. Calculation of component-fractional composition of extracted Kovykta field formation fluid	237
Stepanova M.V., Ekzaryan V.N. Development regularities of plain reservoir shore marginal erosion.....	249
Information for the Authors.....	260



ГЕОЭКОЛОГИЯ

Научная статья

УДК 502.175

EDN: HGQAYH

DOI: 10.21285/2686-9993-2025-48-2-134-145



Изменения эколого-геохимической обстановки в пределах объекта накопленного вреда окружающей среде – промышленной площадки бывшего завода «Востсибэлемент» (2021–2024 гг.)

В.В. Трусова^{a,✉}, А.С. Алексеев^b, О.Л. Качор^c, З.Л. Икрамов^d^{a,c,d}Иркутский национальный исследовательский технический университет, Иркутск, Россия^{a,b}Институт геохимии им. А.П. Виноградова СО РАН, Иркутск, Россия^bИркутский научно-исследовательский институт благородных и редких металлов и алмазов, Иркутск, Россия

Резюме. Важным для экологии Прибайкалья результатом 2024 г. является включение такого объекта накопленного вреда окружающей среде, как промышленная площадка бывшего завода «Востсибэлемент» (г. Свирск), в государственный реестр объектов накопленного вреда окружающей среде с оценкой значения общего влияния объекта на состояние экологической безопасности, составляющей 6,35. Такая высокая оценка определяет приоритет в очереди на рекультивацию и в значительной степени базируется на большом объеме комплексных инициативных эколого-геохимических и инженерно-геологических исследований, проведенных на промплощадке в 2021–2022 гг. исследователями и студентами Иркутского национального исследовательского технического университета, которыми и была впервые дана высокая оценка опасности данного объекта. Однако вследствие того, что хозяйственная деятельность на промплощадке, в том числе активная неконтролируемая деятельность по выемке металлоконструкций стен и фундаментов, продуцирующая перераспределение загрязнений на территории, все эти годы не прекращалась, встал вопрос о необходимости актуализации знаний о ситуации на объекте. Целью проведенного исследования являлось изучение современной геоэкологической ситуации на территории промышленной площадки бывшего завода «Востсибэлемент». Для этого в 2024 г. был проведен комплекс полевых и лабораторных исследований: отобрана и проанализирована 81 проба техногенного грунта. По итогу было дано сравнение результатов эколого-геохимических работ, проведенных в 2021 и 2024 гг. Показано, что ореолы рассеяния основных загрязнений мышьяком и тяжелыми металлами заметно изменились, увеличились концентрации мышьяка в поверхностном слое техногенного грунта, что следовало бы учесть при разработке проекта инженерно-геологических работ и ликвидации исследуемого объекта.

Ключевые слова: геоэкологическая оценка, накопленный вред, экологический мониторинг, загрязнение, тяжелые металлы, техногенное воздействие, Прибайкалье

Для цитирования: Трусова В.В., Алексеев А.С., Качор О.Л., Икрамов З.Л. Изменения эколого-геохимической обстановки в пределах объекта накопленного вреда окружающей среде – бывшего завода «Востсибэлемент» (2021–2024 гг.) // Науки о Земле и недропользование. 2025. Т. 48. № 2. С. 134–145. <https://doi.org/10.21285/2686-9993-2025-48-2-134-145>. EDN: HGQAYH.

GEOECOLOGY

Original article

Changes in the ecological and geochemical situation within the object of accumulated environmental damage – the former Vostsibelement plant industrial site (2021–2024)

Valentina V. Trusova^{a,✉}, Ayaal S. Alekseev^b, Olga L. Kachor^c, Ziyoviddin L. Ikramov^d^{a,c,d}Irkutsk National Research Technical University, Irkutsk, Russia^{a,b}A.P. Vinogradov Institute of Geochemistry of the Siberian Branch of the Russian Academy of Sciences, Irkutsk, Russia^bIrkutsk Research Institute of Precious and Rare Metals and Diamonds, Irkutsk, Russia

Abstract. Inclusion in 2024 of the former industrial site of the Vostsibelement plant (Svirsk) in the state register of objects of accumulated environmental damage with the assessment of the amount of its general impact on the environmental

© Трусова В.В., Алексеев А.С., Качор О.Л., Икрамов З.Л., 2025



safety state of 6.35 is an important result for the ecology of the Baikal region. Such a high assessment determines the priority in the queue for reclamation and is largely based on a large volume of comprehensive initiative ecological-geochemical and engineering-geological studies carried out at the industrial site in 2021–2022 by researchers and students of the Irkutsk National Research Technical University, who were the first to qualify this object of the accumulated damage as highly dangerous. However, due to the continuous economic activity at the industrial site, including active uncontrolled activity on removing metal structures from walls and foundations, which caused redistribution of pollution on the territory, the question arose about the need to update knowledge about the situation at the site. The purpose of the study was to examine the current geoeological situation on the territory of the industrial site of the former Vostsibelelement plant. To accomplish the set goal a set of field and laboratory studies was carried out in 2024: 81 samples of technogenic soil were collected and analyzed. Based on the results of the work performed, a comparison was made of the results of ecological and geochemical works conducted in 2021 and 2024. It was shown that the dispersion halos of the main arsenic and heavy metal contamination have noticeably changed. Arsenic concentrations in the surface layer of technogenic soil have increased, which should be taken into consideration when developing a project for engineering and geological works and the liquidation of the studied object.

Keywords: geoeological assessment, accumulated damage, environmental monitoring, contamination, heavy metals, man-made impact, Baikal region

For citation: Trusova V.V., Alekseev A.S., Kachor O.L., Ikramov Z.L. Changes in the ecological and geochemical situation within the object of accumulated environmental damage – the former Vostsibelelement plant industrial site (2021–2024). *Earth sciences and subsoil use*. 2025;48(2):134-145. (In Russ.). <https://doi.org/10.21285/2686-9993-2025-48-2-134-145>. EDN: HGQAYH.

Введение

Под накопленным вредом окружающей среде понимается вред окружающей среде, возникший в результате прошлой экономической и иной деятельности, обязанности по устранению которого не были выполнены либо были выполнены не в полном объеме¹. Объекты накопленного вреда окружающей среде не только являются источниками негативного воздействия на окружающую среду, но и негативно влияют на здоровье населения, проживающего на данных территориях [1–15]. По данным на 7 марта 2025 г. государственный реестр объектов накопленного вреда окружающей среде включает 1075 объектов, 90 из них расположены на территории Иркутской области.

Четыре новых объекта были включены в реестр в 2024 г.² Одним из них стала промплощадка бывшего завода «Востсибэлемент» (г. Свирск), которая является объектом внимания различных исследовательских коллективов Иркутского национального исследовательского университета с 2021 г. На объекте, который изначально не считался сколько-нибудь существенным, был проведен значительный объем инженерно-экологических, инженерно-геофизических, геодезических, эколого-геохимических работ [16, 17], были обнаружены

отходы вплоть до второго класса опасности и обоснована необходимость включения объекта в реестр объектов накопленного вреда окружающей среде [16]. Приказом от 19.12.2024 № 742 промышленная площадка бывшего завода «Востсибэлемент» («Оставшиеся цеха бывшего Востсибэлемент в г. Свирск (Иркутская область)») была внесена в государственный реестр со значением общего влияния объекта накопленного вреда окружающей среде на состояние экологической безопасности 6,35². Для сравнения: значение общего влияния объекта накопленного вреда окружающей среде на состояние экологической безопасности таких общеизвестных и рекультивируемых в настоящее время объектов, как Байкальский целлюлозно-бумажный комбинат и «Усольехимпром», согласно этому же реестру, составляет 2,25 и 3,25 соответственно. Таким образом, необходимость скорейшей рекультивации данного объекта была признана официально.

На протяжении всего указанного времени промышленная площадка оставалась не просто общедоступной – на ней продолжали работать несколько действующих предприятий, помимо этого, производился нелегальный разбор конструкций, зданий и сооружений. Влияние ветрового переноса образующейся вследствие данного факта пыли на эколого-геохимическую

¹ Об охране окружающей среды: федер. закон от 10.01.2002 № 7-ФЗ // КонсультантПлюс. Режим доступа: https://www.consultant.ru/document/cons_doc_LAW_34823/?ysclid=m6r7foam27754083617 (дата обращения: 20.02.2025).

² Направления работы Минприроды России. Ликвидация накопленного вреда окружающей среде // Министерство природных ресурсов и экологии Российской Федерации: официальный сайт. Режим доступа: https://www.mnr.gov.ru/activity/directions/likvidatsiya_nakoplennoego_vreda_okruzhayushchey_srede/. (дата обращения: 05.04.2025).



обстановку окружающих объектов было отмечено на заметном расстоянии от промплощадки [18]. Безусловно, это не могло не привести к изменению геохимической ситуации и на самом объекте. Изучение степени этих изменений с соответствующей переоценкой текущего состояния территории промплощадки бывшего завода «Востсибэлемент» являлось целью проведенного исследования.

Завод по производству аккумуляторов ОАО «Востсибэлемент» был основан в 1939 г. и просуществовал до 1999 г., после чего на небольшом участке основной территории закрытого завода на базе бывшего цеха серебряно-цинковых батарей создана компания «Аккумуляторные технологии», которая по настоящее время занимается выпуском химических источников тока. Также часть площадей бывшей промплощадки занимают действующие малые предприятия, чья деятельность не связана с деятельностью бывшего завода «Востсибэлемент» [16].

На сегодняшний день заброшенная промплощадка представляет собой разрушенные в разной степени цеха и производственные помещения (рис. 1), отходы неустановленного происхождения и техногенный грунт, который в силу своего высокого загрязнения правильнее было бы характеризовать как техногенные поверхностные образования [19].

В последние два года на заброшенной промплощадке бывшего завода «Востсибэлемент» ведется активная неконтролируемая деятельность по выемке металлоконструкций, в том числе с глубины фундаментов, с соответствующим разбором имеющихся зданий и сооружений, что ведет к значительному повышению пылепереноса. Ранее было показано, что на глубине от 1,5 м залегает глиняный слой, способствующий накоплению и закреплению на нем значительного количества токсикантов. Так, содержание свинца на отдельных шурфах оказалось сопоставимым с его содержанием на поверхности и ниже, а содержание



Рис. 1. Разрушенные цеха на промплощадке бывшего завода «Востсибэлемент», октябрь 2024 г. (фото авторов)

Fig. 1. Workshop debris at the industrial site of the former Vostsibelement plant, October 2024 (authors' image)



мышьяка превысило приповерхностные значения [16]. В результате исследования была выдвинута гипотеза о том, что в связи с повышенной активностью на территории бывшей промплощадки «Востсибэлемента» большое количество загрязняющих веществ вместе с изымаемыми с глубин металлоконструкциями снова оказалось на поверхности, изменив ореолы локализации токсикантов и увеличив их содержание в поверхностном слое.

Материалы и методы исследования

Осенью 2024 г. на территории промплощадки бывшего завода «Востсибэлемент» в соответствии с ГОСТ 17.4.3.01-2017³ был проведен очередной отбор проб техногенного грунта. Составление схемы пробных площадок основывалось на результатах ранее проведенных исследований и корректировалось уже на самой территории объекта (не все места на мо-

мент проведения исследований были проходимыми) [16]. Общее количество отобранных образцов техногенного грунта составило 81 шт. После отбора и доставки в лабораторию пробы прошли пробоподготовку в соответствии с ГОСТ 17.4.4.02-2017⁴ и были проанализированы с помощью портативного рентгенофлуоресцентного анализатора SciAps серии X в режиме «Почва». Данный метод обладает рядом преимуществ, среди которых можно выделить экономическую целесообразность, а также быстрое и точное определение содержания химических элементов [20].

В ходе отбора проб было отмечено, что на территории промплощадки появилось большое количество отходов от разбора зданий и сооружений, строительного мусора, а также располагаются места несанкционированного размещения твердых коммунальных отходов (в 2021 г. в таком масштабе подобное не отмечалось) (рис. 2).



Рис. 2. Отходы производства и потребления на промплощадке бывшего завода «Востсибэлемент» (фото авторов)

Fig. 2. Production and consumption waste at the former Vostsibelemt plant industrial site (authors' image)

³ ГОСТ 17.4.3.01-2017. Межгосударственный стандарт. Охрана природы. Почвы. Общие требования к отбору проб // Tunadzor.ru. Режим доступа: http://tunadzor.ru/upload/doc/departments/298/gost_17.4.3.01-2017.pdf (дата обращения: 25.03.2025).

⁴ ГОСТ 17.4.4.02-2017. Межгосударственный стандарт. Охрана природы. Почвы. Методы отбора и подготовки проб для химического, бактериологического, гельминтологического анализа // Россельхознадзор. Режим доступа: <https://fsvps.gov.ru/files/gost-17-4-4-02-2017-mezhgosudarstvennyj-standart/> (дата обращения: 25.03.2025).



Для визуальной оценки изменения территории в связи с несанкционированными работами по разборке зданий и сооружений были изучены снимки со спутника (рис. 3).

Из рис. 3 видно, что с 2021 г. большая часть заброшенных цехов в центральной, юго-западной и юго-восточной частях промплощадки была разобрана. Полностью разрушены склад готовой продукции, котельная, подстанция, угольно-прессовый цех, мешально-мельничное отделение, заготовительный участок по прессованию агломератов для гальванических элементов из агломератной массы, сборочный цех по изготовлению различных марок гальванических элементов, прессово-паяльный участок, участок элементного производства, цех по переработке свинца и др. То есть это специализированные цеха, строительные элементы которых (кирпич, бетонные перекрытия и т. д.) за десятилетия работы завода были способны адсорбировать в себя массу загрязняющих веществ.

Разбор зданий происходит в основном бесконтрольно и без разрешительной документации, соответственно, и без проведения мероприятий по пылеподавлению. Мусор от разбора зданий и сооружений остается на ме-

сте и также может являться серьезным источником вторичного загрязнения объектов окружающей среды.

Результаты исследования и их обсуждение

По результатам проведенных исследований были построены карты распределения тяжелых металлов и мышьяка в техногенных грунтах промплощадки. На рис. 4, 5 в качестве примера приведены карты распределения концентраций свинца и мышьяка в верхнем горизонте промплощадки, выделены 4 зоны (полигоны А, Б, В, Г). Разбивка на данные участки производилась с учетом распределения концентраций металлов в техногенном грунте по данным 2021 г. (участки с относительно невысоким содержанием и с наибольшим содержанием металлов) [16] для опробования технологии извлечения металлов и мышьяка на участках с разной степенью загрязнения. Полигон А характеризовался как участок с невысокими относительно остальной территории концентрациями свинца (до 2000 мг/кг) и мышьяка (до 70 мг/кг). Полигон Б – со средним содержанием свинца (8000–10000 мг/кг) и сред-

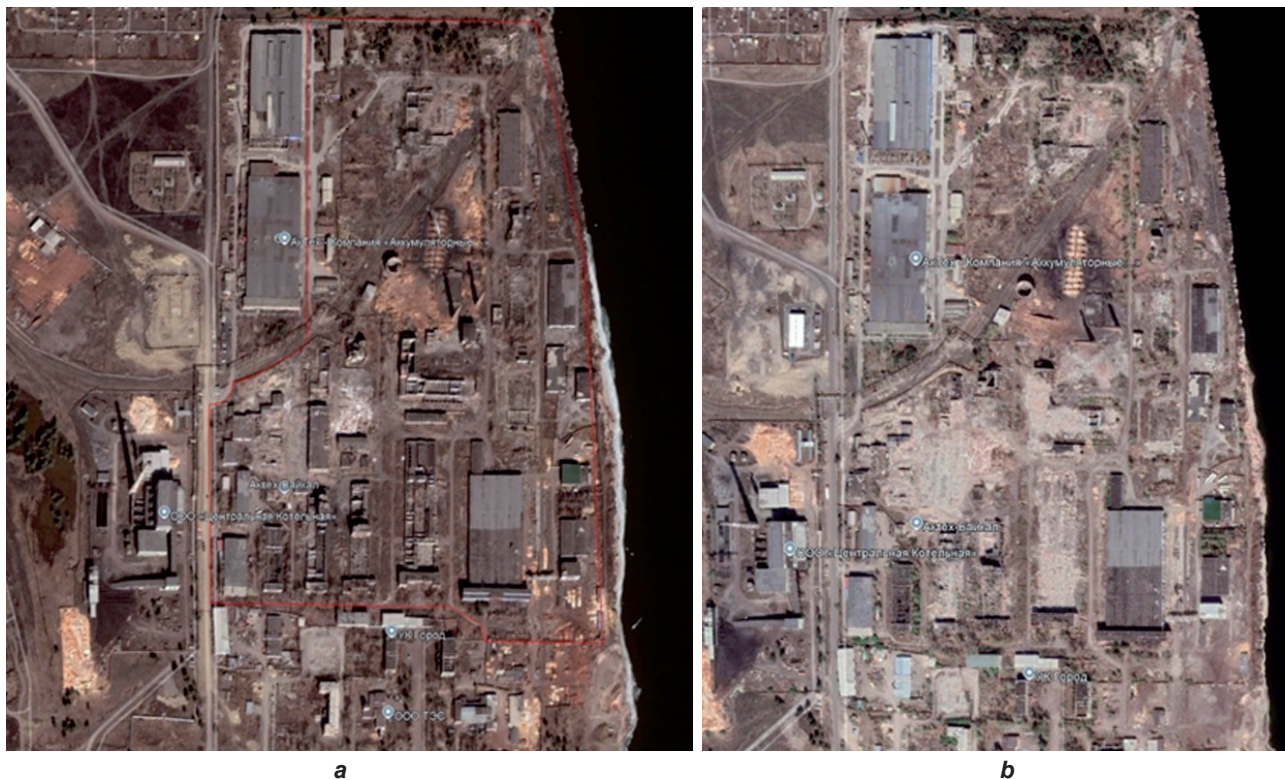


Рис. 3. Космоснимки территории промплощадки бывшего завода «Востсибэлемент»: а – 2021 г.; б – 2024 г.

Fig. 3. Satellite images of the industrial site of the former Vostsibelement plant: а – 2021; б – 2024



ним содержанием мышьяка (100–200 мг/кг). Полигон В характеризовался как участок с высокой усредненной концентрацией свинца (около 20000 мг/кг) и низкой концентрацией мышьяка (усредненно до 70 мг/кг). Полигон Г был отмечен очень высоким содержанием свинца (30000 мг/кг) и высоким усредненным значением по содержанию мышьяка (около 400 мг/кг). Если отбор проб к западу от полигона В был затруднен в связи с плохой проходимость участка из-за развалин зданий и металлоконструкций в 2021 г., то в 2024 г. безопасно провести его вообще не представлялось возможным. Также из-за малого объема проб (около 2 кг), достаточного только для проведения химического анализа, но не для исследования на обогатимость, этот западный участок не вошел в полигон Г. Кроме того, из исследований, проведенных в 2024 г., а также из контуров полигонов был исключен участок, расположенный ближе к

центру площадки, который включает в себя угольную яму, где сейчас ведется активная деятельность по производству угольных брикетов (к этому участку в 2024 г. не было доступа). Из исследований на обогатимость этот участок убрали на основании результатов, полученных в 2021 г., так как уже в то время деятельность по производству угольных брикетов набирала обороты, хотя и с открытым доступом на территорию, но пробы техногенного грунта уже были крайне загрязнены углем.

На рис. 4 видно, что отсутствие какого-либо рода деятельности в северной части промплощадки (полигоны А и Б) способствовало сохранению практически первоначальной (на 2021 г.) картины загрязнения. Ни ореолы распространения, ни концентрации свинца существенно не изменились. Чего нельзя сказать о южной части промплощадки. На полигонах В и Г усредненные концентрации заметно по-

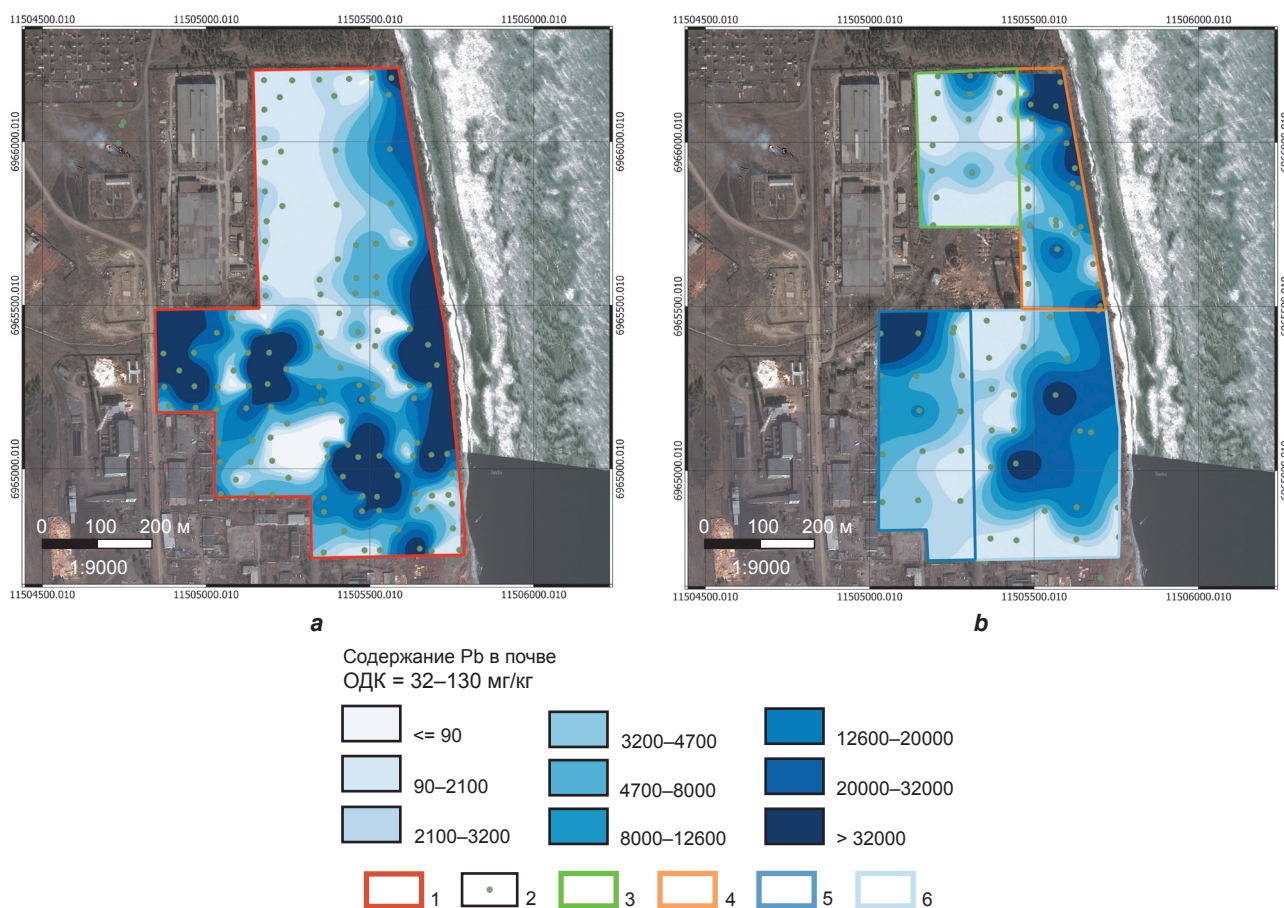


Рис. 4. Карта распределения содержания свинца в техногенном грунте промплощадки бывшего завода «Востсибэлемент» в 2021 (а) и 2024 (б) гг.:

1 – граница промплощадки; 2 – точки пробоотбора; 3 – полигон А; 4 – полигон Б; 5 – полигон В; 6 – полигон Г

Fig. 4. Map of lead content distribution in the technogenic soil of the industrial site of the former Vostsibelelement plant in 2021 (a) and 2024 (b):

1 – boundary of the industrial site; 2 – sampling points; 3 – polygon A; 4 – polygon B; 5 – polygon V; 6 – polygon G



низились (до 10000–20000 мг/кг), а ореолы их локализации сместились.

Изменение характера загрязнения мышьяком поверхностных техногенных образований имеет совершенную другую картину (см. рис. 5). Изменения коснулись всех полигонов, то есть даже тех, на которых масштабная деятельность по разбору зданий и сооружений не проводилась. На полигоне А средняя концентрация мышьяка увеличилась с 70 до 130 мг/кг, на полигоне Б со 100–200 до 400–500 мг/кг. Вероятно, на такое изменение могло оказать влияние пыление с южных полигонов промплощадки, а также с соседних территорий [18]. На полигонах В и Г ореолы высоких концентраций мышьяка повсеместно заметно увеличились. На полигоне В обнаружилась новая, ранее не фиксируемая аномалия с содержанием более 880 мг/кг.

Прослеживая динамику изменения характера загрязнения на промплощадке, можно

отметить следующее: ореолы распространения обоих приоритетных загрязнителей изменились и, что крайне важно, в результате новых исследований было выявлено, что участки с наибольшими концентрациями свинца и мышьяка совпадают и практически повторяют друг друга, чего не отмечалось ранее. С учетом того, что на глубине около 1,5 м содержание свинца было ниже приповерхностных концентраций, а мышьяка, наоборот, больше [16], был сделан следующий вывод: при проведении несанкционированных работ по выемке металлоконструкций и коммуникаций с глубины со значительным перемещением земляных масс (на некоторых участках и с глубины около 1,5 м) (рис. 6) слои техногенного грунта перераспределились, частично перекрыв нижним слоем грунта с более низким содержанием свинца, но большим содержанием мышьяка грунт, обследованный в 2021 г.

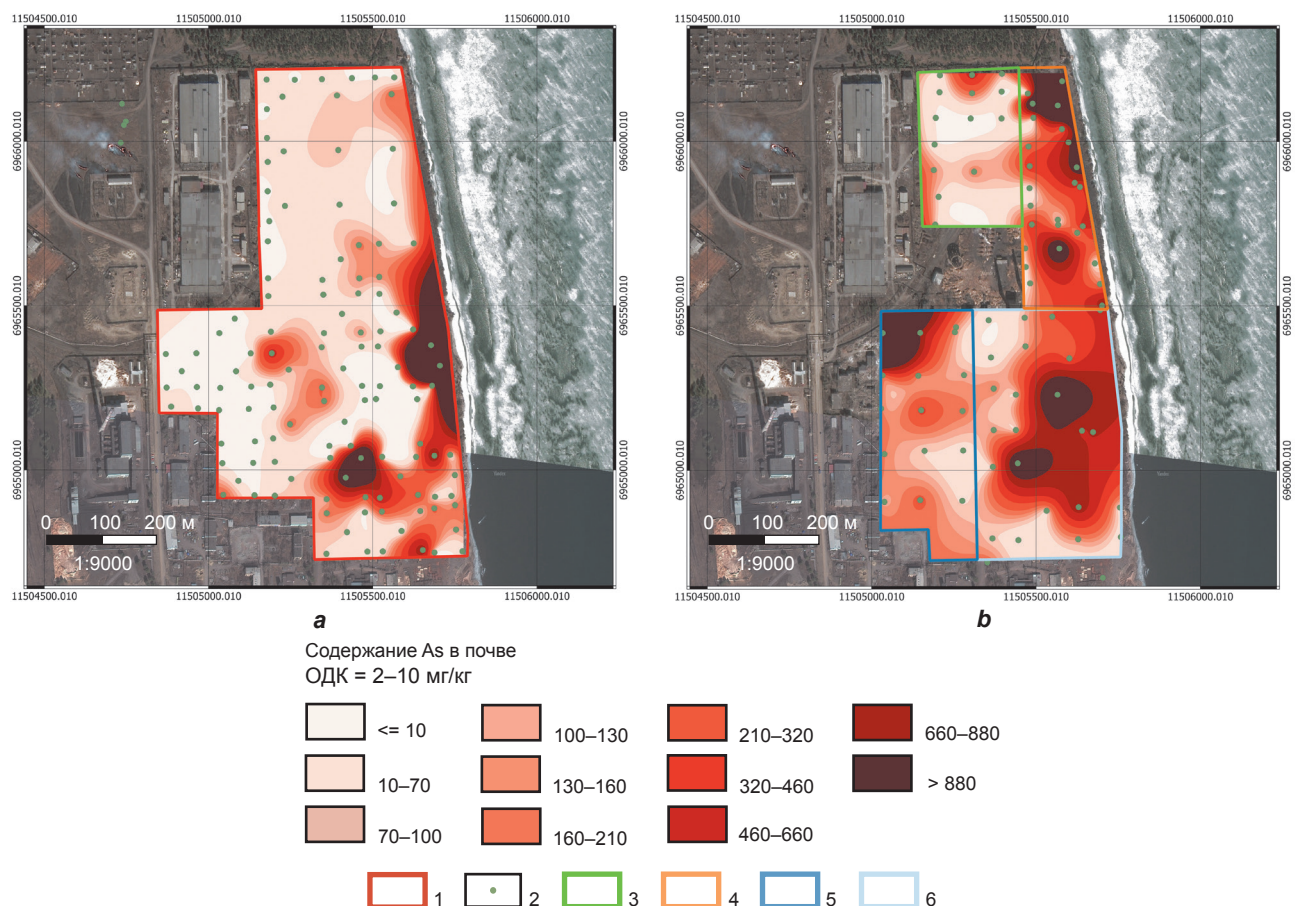


Рис 5. Карта распределения содержания мышьяка в техногенном грунте промплощадки бывшего завода «Востсибэлемент» в 2021 (а) и 2024 (б) гг.

Условные обозначения см. на рис. 4

Fig. 5. Map of arsenic content distribution in the technogenic soil of the industrial site of the former Vostsibelement plant in 2021 (a) and 2024 (b)

The symbols are shown in Fig. 4



Рис. 6. Измерение глубины выкопанной траншеи при несанкционированной выемке коммуникаций (около 1,7 м) (фото авторов)

Fig. 6. Measuring the depth of a trench dug during unauthorized removal of utilities (about 1.7 m) (authors' image)

Заключение

Объекты накопленного вреда окружающей среде представляют серьезную угрозу для здоровья населения и экосистем в целом. Своевременная ликвидация таких объектов является одним из условий улучшения качества окружающей среды и экологического благополучия.

В ходе проведенного исследования было выявлено, что геозкологическое состояние территории промплощадки бывшего завода «Востсибэлемент» подверглось следующим изменениям: были бесконтрольно разобраны многие заброшенные цеха завода, непосред-

ственно связанные с основным производством и загрязненные основными токсикантами аккумуляторного производства, произошла выемка фундаментов с целью изъятия металлоконструкций. Все эти действия привели к значительному перемещению земляных масс на ранее обследованной территории. В ходе работы было выявлено смещение ореолы распространения мышьяка и свинца, увеличились концентрации мышьяка в поверхностном слое техногенного грунта. Установленная ситуация с изменением характера и локализации загрязнения должна быть учтена при разработке проекта по ликвидации объекта.

Список источников

1. Пичугин Е.А., Дьяков М.С. Оценка воздействия несанкционированных свалок твердых коммунальных отходов, расположенных в Арктической зоне Российской Федерации, на компоненты природной среды // Экология и промышленность России. 2024. Т. 28. № 4. С. 40–45. <https://doi.org/10.18412/1816-0395-2024-4-40-45>. EDN: MRMQNQ.
2. Алыкова О.И., Чуйкова Л.Ю., Чуйков Ю.С. Накопленный экологический вред: проблемы и последствия. Сообщение 1. Государственный реестр ОНВОС // Астраханский вестник экологического образования. 2021. № 2. С. 88–113. <https://doi.org/10.36698/2304-5957-2021-2-88-113>. EDN: BJSXVZ.
3. Алыкова О.И., Чуйкова Л.Ю., Чуйков Ю.С. Накопленный экологический вред: проблемы и последствия. Сообщение 2. Анализ ситуации // Астраханский вестник экологического образования. 2021. № 2. С. 114–137. <https://doi.org/10.36698/2304-5957-2021-2-114-137>. EDN: FMUSDM.
4. Май И.В., Максимова Е.В., Термулаева Р.М., Хамидов Р.Х., Сардалова Л.Э., Ирипханов И.И. Нефтешламовые амбары как объекты накопленного вреда окружающей среде и источники риска для здоровья населения // Гигиена и санитария. 2022. Т. 101. № 11. С. 1283–1289. <https://doi.org/10.47470/0016-9900-2022-101-11-1283-1289>. EDN: NJCEBY.



5. Кучерская Т.И., Аликбаева Л.А., Якубова И.Ш., Рыжков А.Л., Мощев А.Н., Фомин М.В. [и др.]. Характеристика территорий ртутного загрязнения как объектов накопленного вреда окружающей среде (научный обзор) // Профилактическая и клиническая медицина. 2024. № 4. С. 22–29. EDN: YABLSY.
6. Качор О.Л., Икрамов З.Л., Паршин А.В. Первые результаты переоценки состояния окружающей среды в зоне влияния бывшего мышьякового завода в поселке городского типа Вершино-Дарасунский (Забайкальский край) // Науки о Земле и недропользование. 2024. Т. 47. № 4. С. 453–467. <https://doi.org/10.21285/2686-9993-2024-47-4-453-467>. EDN: OEXJEG.
7. Пичугин Е.А., Шенфельд Б.Е. Здоровье граждан и продолжительность их жизни как критерий при оценке негативного воздействия объектов накопленного вреда окружающей среде на состояние окружающей среды и человека // Экология урбанизированных территорий. 2021. № 3. С. 62–70. <https://doi.org/10.24412/1816-1863-2021-3-62-70>. EDN: MDYBDH.
8. Панков П.П., Коновалова Н.А., Бесполитов Д.В. Изучение состава и свойств золошлаковых отходов ТЭС Забайкальского края для снижения антропогенного воздействия на окружающую среду // Вестник Российского университета дружбы народов. Серия: Экология и безопасность жизнедеятельности. 2020. Т. 28. № 2. С. 131–141. <https://doi.org/10.22363/2313-2310-2020-28-2-131-141>. EDN: QFZDRG.
9. Алыкова О.И., Чуйкова Л.Ю., Чуйков Ю.С. Накопленный вред окружающей среде: Астраханская область. Планы // Астраханский вестник экологического образования. 2024. № 6. С. 51–60. <https://doi.org/10.36698/2304-5957-2024-6-51-60>. EDN: HAUADR.
10. Макаров И.Н. Влияние объектов накопленного вреда на окружающую среду в арктической территории Якутии (на примере хвостохранилища Депутатского ГОК) // Проблемы региональной экологии. 2023. № 5. С. 16–20. <https://doi.org/10.24412/1728-323X-2023-5-16-20>. EDN: KNYVSV.
11. Дашкевич А.С., Занько Н.Г., Раковская Е.Г. Накопленный вред окружающей среде как угроза экологической безопасности // Вестник МАНЭБ. 2023. Т. 28. № 4. С. 78–82. EDN: ICRQOZ.
12. Макагонов Р.А., Васильева Д.И. Объекты накопленного вреда окружающей среде в Самарской области: проблема и пути решения // Инновации в природообустройстве и защите в чрезвычайных ситуациях: материалы X Междунар. науч.-практ. конф. (г. Саратов, 16–17 мая 2023 г.). Саратов: Изд-во Саратовского государственного университета генетики, биотехнологии и инженерии имени Н.И. Вавилова, 2023. С. 218–222. EDN: YQKYDY.
13. Скрипак Ю.С., Чуйков Ю.С., Чуйкова Л.Ю. Кошкар-Ата – накопленный экологический ущерб и современные экологические проблемы // Астраханский вестник экологического образования. 2018. № 3. С. 84–94. EDN: XQVUVV.
14. Пичугин Е.А., Шенфельд Б.Е., Сомова Т.Н. Оценка воздействия объектов накопленного вреда в Арктике на компоненты природной среды // Арктика: экология и экономика. 2024. Т. 14. № 2. С. 249–260. <https://doi.org/10.25283/2223-4594-2024-2-249-260>. EDN: ONNRDC.
15. Ашихмина Т.В., Каверина Н.В. Геоэкологический мониторинг накопленного экологического вреда при обращении с отходами животноводства в Воронежской области // Региональные геосистемы. 2022. Т. 46. № 4. С. 596–614. <https://doi.org/10.52575/2712-7443-2022-46-4-596-614>. EDN: JWXKVK.
16. Качор О.Л., Паршин А.В., Трусова В.В. Комплексный подход к геоэкологической оценке объектов накопленного вреда // Теоретическая и прикладная экология. 2022. № 4. С. 65–71. <https://doi.org/10.25750/1995-4301-2022-4-065-071>. EDN: ADEBVY.
17. Богданов А.В., Зелинская Е.В., Верховзин И.И., Шкрабо А.И., Шатрова А.С. Мониторинг источников накопленного вреда промплощадки бывшего аккумуляторного завода «Востсибэлемент» // Технологические и экологические аспекты добычи и переработки природного и техногенного сырья (Леоновские чтения – 2023): материалы I Всеросс. науч.-практ. конф. (г. Иркутск, 28 февраля 2023 г.). Иркутск: Изд-во ИРНИТУ, 2023. С. 15–18. EDN: FISKBS.
18. Качор О.Л., Трусова В.В., Гантимурова С.А., Горячев И.Н., Икрамов З.Л., Паршин А.В. Территория бывшей промплощадки Ангарского металлургического завода (г. Свирск) 10 лет спустя: современное геохимическое состояние и анализ межгодовых изменений по данным дистанционного зондирования Земли // Науки о Земле и недропользование. 2024. Т. 47. № 1. С. 66–89. <https://doi.org/10.21285/2686-9993-2024-47-1-66-89>. EDN: LPXNLT.
19. Трусова В.В., Качор О.Л., Алексеев А.С., Паршин А.В. Первые результаты применения методов обогащения полезных ископаемых для извлечения металлов из техногенно загрязненных почвогрунтов с существенным содержанием органического вещества // Науки о Земле и недропользование. 2023. Т. 46. № 4. С. 432–444. <https://doi.org/10.21285/2686-9993-2023-46-4-432-444>. EDN: PYLLUR.
20. Кузнецова О.В., Качор О.Л., Матюхин И.А., Икрамов З.Л., Паршин А.В. Экспрессный рентгенофлуоресцентный анализ как современная альтернатива традиционным спектральным методам при решении задач геохимических поисков // Науки о Земле и недропользование. 2023. Т. 46. № 4. С. 390–401. <https://doi.org/10.21285/2686-9993-2023-46-4-390-401>. EDN: XMXIYB.

References

1. Pichughin E.A., Diakov M.S. Assessment of the impact of unauthorized landfills of solid municipal waste located in the Arctic zone of the Russian Federation on the components of the natural environment. *Ecology and Industry of Russia*. 2024;28(4):40-45. (In Russ.). <https://doi.org/10.18412/1816-0395-2024-4-40-45>. EDN: MRMQNG.
2. Alykova O.I., Chuikova L.Yu., Chuikov Yu.S. Accumulated environmental damage: problems and consequences. Message 1. State register of the objects of accumulated environmental damage. *Astrakhan Bulletin of Ecological Education*. 2021;2:88-113. (In Russ.). <https://doi.org/10.36698/2304-5957-2021-2-88-113>. EDN: BJSXVZ.



3. Alykova O.I., Chuikova L.Yu., Chuikov Yu.S. Accumulated environmental damage: problems and consequences. Message 2. Situation analysis. *Astrakhan Bulletin of Ecological Education*. 2021;2:114-137. (In Russ.). <https://doi.org/10.36698/2304-5957-2021-2-114-137>. EDN: FMUSDM.
4. May I.V., Maksimova E.V., Termulaeva R.M., Khamidov R.H., Sardalova L.E., Iripkhanov I.I. Oil sludge barns as objects of accumulated environmental damage and sources of public health risks. *Hygiene and Sanitation*. 2022;101(11):1283-1289. (In Russ.). <https://doi.org/10.47470/0016-9900-2022-101-11-1283-1289>. EDN: NJCEBY.
5. Kucherskaya T.I., Alikbaeva L.A., Yakubova I.Sh., Ryzhkov A.L., Moshchev A.N., Fomin M.V., et al. Characteristics of mercury contaminated areas as objects of accumulated environmental damage (scientific review). *Preventive and Clinical Medicine*. 2024;4:22-29. (In Russ.). EDN: YABLSY.
6. Kachor O.L., Ikramov Z.L., Parshin A.V. First reassessment results of environment state in former arsenic plant impact zone in Vershino-Darasunsky settlement (Transbaikalian region). *Earth sciences and subsoil use*. 2024;47(4):453-467. (In Russ.). <https://doi.org/10.21285/2686-9993-2024-47-4-453-467>. EDN: OEXJEG.
7. Pichugin E.A., Shenfeld B.E. The health of citizens and their life expectancy as a criterion for assessing the negative impact of objects of accumulated environmental damage on the state of the environment and man. *Ecology of Urban Areas*. 2021;3:62-70. (In Russ.). <https://doi.org/10.24412/1816-1863-2021-3-62-70>. EDN: MDYBDH.
8. Pankov P.P., Konovalova N.A., Bespolitov D.V. Research of composition and properties of ash and slag waste from the thermal power plant of Trans-Baikal region for decrease of anthropogenic impact on environment. *RUDN Journal of Ecology and Life Safety*. 2020;28(2):131-141. (In Russ.). <https://doi.org/10.22363/2313-2310-2020-28-2-131-141>. EDN: QFZDRG.
9. Alykova O., Chuikova L., Chuikov Yu. Accumulated environmental damage: Astrakhan Region. Plans. *Astrakhan Bulletin of Ecological Education*. 2024;6:51-60. (In Russ.). <https://doi.org/10.36698/2304-5957-2024-6-51-60>. EDN: HAUADR.
10. Makarov I.N. The impact of accumulated damage objects on the environment in the Arctic territory of Yakutia: a case study of the tailing dump of the Deputatsky Mining and Processing Plant. *Regional Environmental Issues*. 2023;5:16-20. (In Russ.). <https://doi.org/10.24412/1728-323X-2023-5-16-20>. EDN: KNYVSV.
11. Dashkevich A.S., Zanko N.G., Rakovskaya E.G. Accumulated harm to the environment as a threat to ecological safety. *Westnik IAELPS*. 2023;28(4):78-82. (In Russ.). EDN: ICRQOZ.
12. Makagonov R.A., Vasilyeva D.I. Objects of accumulated environmental damage in the Samara region: the problem and solutions. In: *Innovatsii v prirodoobustroytve i zashchite v chrezvychaynykh situatsiyakh: materialy X Mezhdunar. nauch.-prakt. konf. = Innovations in environmental management and protection in emergency situations: Proceedings of the 10th International Scientific and Practical Conference*. 16–17 May 2023, Saratov. Saratov: Saratov State University of Genetics, Biotechnology and Engineering named after N.I. Vavilov; 2023, p. 218-222. (In Russ.). EDN: YQKYDY.
13. Skripak Y.S., Chuikov Yu.S., Chuikova L.Yu. Koshkar-Ata - accumulated environmental damage and environmental problems of today. *Astrakhan Bulletin of Ecological Education*. 2018;3:84-94. (In Russ.). EDN: XQVUVV.
14. Pichugin E.A., Shenfeld B.E., Somova T.N. Assessment of the impact of accumulated harm objects in the Arctic on the natural environment components. *Arctic: Ecology and Economy*. 2024;14(2):249-260. (In Russ.). <https://doi.org/10.52583/2223-4594-2024-2-249-260>. EDN: ONNRDC.
15. Ashikhmina T.V., Kaverina N.V. Geoecological monitoring of accumulated environmental damage in the handling of livestock waste in the Voronezh Region. *Regional Geosystems*. 2022;46(4):596-614. (In Russ.). <https://doi.org/10.52575/2712-7443-2022-46-4-596-614>. EDN: JWVKVK.
16. Kachor O.L., Parshin A.V., Trusova V.V. An integrated approach to the geoecological assessment of accumulated damage objects. *Theoretical and Applied Ecology*. 2022;4:65-71. (In Russ.). <https://doi.org/10.25750/1995-4301-2022-4-065-071>. EDN: ADEBVY.
17. Bogdanov A.V., Zelinskaya E.V., Verkhozin I.I., Shkrabo A.I., Shatrova A.S. Monitoring sources of accumulated damage at the industrial site of the former battery plant "Vostsibelement". In: *Tekhnologicheskie i ekologicheskie aspekty dobychi i pererabotki prirodnogo i tekhnogennogo syr'ya (Leonovskie chteniya – 2023): materialy I Vseross. nauch.-prakt. konf. = Technological and environmental aspects of extraction and processing of natural and man-made raw materials (Leonovskie Readings – 2023): proceedings of the 1st All-Russian Scientific and Practical Conference*. 28 February 2023, Irkutsk. Irkutsk: Irkutsk National Research Technical University; 2023, p. 15-18. (In Russ.). EDN: FISKBS.
18. Kachor O.L., Trusova V.V., Gantimurova S.A., Goryachev I.N., Ikramov Z.L., Parshin A.V. The former industrial site of the Angarsk Metallurgical Plant (Svirsk, Russia) 10 years later: current geochemical state and interannual change analysis based on Earth remote sensing data. *Earth sciences and subsoil use*. 2024;47(1):66-89. (In Russ.). <https://doi.org/10.21285/2686-9993-2024-47-1-66-89>. EDN: LPXNLT.
19. Trusova V.V., Kachor O.L., Alekseev A.S., Parshin A.V. First results of using mineral concentration methods for metal recover from technogenically contaminated soils with significant organic concentrations. *Earth sciences and subsoil use*. 2023;46(4):432-444. (In Russ.). <https://doi.org/10.21285/2686-9993-2023-46-4-432-444>. EDN: PYLLUR.
20. Kuznetsova O.V., Kachor O.L., Matyuhin I.A., Ikramov Z.L., Parshin A.V. Rapid X-ray fluorescence analysis as a modern alternative to traditional spectral methods in geochemical prospecting. *Earth sciences and subsoil use*. 2023;46(4):390-401. (In Russ.). <https://doi.org/10.21285/2686-9993-2023-46-4-390-401>. EDN: XMXIYB.



Информация об авторах / Information about the authors



Трусова Валентина Валерьевна,
кандидат технических наук,
старший научный сотрудник департамента геоэкологии,
институт «Сибирская школа геонаук»,
Иркутский национальный исследовательский технический университет,
г. Иркутск, Россия,
старший научный сотрудник лаборатории геохимии рудообразования
и геохимических методов поисков,
Институт геохимии им. А.П. Виноградова СО РАН,
г. Иркутск, Россия,
✉ vvtrusova@geo.istu.edu
<https://orcid.org/0000-0002-8168-9537>

Valentina V. Trusova,
Cand. Sci. (Eng.),
Senior Researcher of the Geoecology Department,
Siberian School of Geosciences,
Irkutsk National Research Technical University,
Irkutsk, Russia,
Senior Researcher of the Laboratory of Geochemistry of Ore Formation
and Geochemical Prospecting Methods,
A.P. Vinogradov Institute of Geochemistry of the Siberian Branch
of the Russian Academy of Sciences,
Irkutsk, Russia,
✉ vvtrusova@geo.istu.edu
<https://orcid.org/0000-0002-8168-9537>



Алексеев Аяал Семенович,
аспирант,
Институт геохимии им. А.П. Виноградова СО РАН,
г. Иркутск, Россия,
младший научный сотрудник лаборатории обогащения минерального сырья,
Иркутский научно-исследовательский институт благородных и редких
металлов и алмазов,
г. Иркутск, Россия,
✉ jr.alexeev@gmail.com
<https://orcid.org/0009-0005-8014-9570>

Ayaa S. Alekseev,
Postgraduate Student,
A.P. Vinogradov Institute of Geochemistry of the Siberian Branch
of the Russian Academy of Sciences,
Irkutsk, Russia,
Junior Researcher,
Laboratory of Mineral Raw Materials Concentration,
Irkutsk Research Institute of Precious and Rare Metals and Diamonds,
Irkutsk, Russia,
✉ jr.alexeev@gmail.com
<https://orcid.org/0009-0005-8014-9570>



Качор Ольга Леонидовна,
доктор технических наук,
руководитель департамента геоэкологии,
институт «Сибирская школа геонаук»,
Иркутский национальный исследовательский технический университет,
г. Иркутск, Россия,
✉ olgakachor@geo.istu.edu
<https://orcid.org/0000-0003-1889-9934>

Olga L. Kachor,
Dr. Sci. (Eng.),
Head of the Geoecology Department,
Siberian School of Geosciences,
Irkutsk National Research Technical University,
Irkutsk, Russia,
✉ olgakachor@geo.istu.edu
<https://orcid.org/0000-0003-1889-9934>



Икрамов Зиёвиддин Лутфиддин угли,
инженер-исследователь,
институт «Сибирская школа геонаук»,
Иркутский национальный исследовательский технический университет,
г. Иркутск, Россия,
ziyoviddin.ikramov1992@gmail.com
<https://orcid.org/0009-0006-2708-0989>
Ziyoviddin L. Ikramov,
Research Engineer,
Siberian School of Geosciences,
Irkutsk National Research Technical University,
Irkutsk, Russia,
ziyoviddin.ikramov1992@gmail.com
<https://orcid.org/0009-0006-2708-0989>

Вклад авторов / Contribution of the authors

В.В. Трусова – разработка методологии, проведение исследования, административное руководство исследовательским проектом, написание черновика рукописи.

А.С. Алексеев – проведение исследования, курирование данных, написание черновика рукописи.

О.Л. Качор – валидация результатов, разработка концепции, написание черновика рукописи, редактирование рукописи.

З.Л. Икрамов – курирование данных, проведение исследования, визуализация.

Valentina V. Trusova – methodology, investigation, project administration, writing – original draft.

Ayaal S. Alekseev – investigation, data curation, writing – original draft.

Olga L. Kachor – validation, conceptualization, writing – original draft, writing – editing.

Ziyoviddin L. Ikramov – data curation, investigation, visualization.

Конфликт интересов / Conflict of interests

Авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов.

The authors declare no conflict of interests.

Все авторы прочитали и одобрили окончательный вариант рукописи.

The final manuscript has been read and approved by all the co-authors.

Информация о статье / Information about the article

Статья поступила в редакцию 08.04.2025; одобрена после рецензирования 28.04.2025; принята к публикации 12.05.2025.

The article was submitted 08.04.2025; approved after reviewing 28.04.2025; accepted for publication 12.05.2025.



GEOECOLOGY

Review article

EDN: PFDPVE

DOI: 10.21285/2686-9993-2025-48-2-146-159



Comparison of geopark management systems and development strategies in China and Russia

Svetlana A. Gantimurova^a, Angelina K. Karaeva^b, Efim A. Slyadnev^c,
Yongzhan Zhang^d, Yulan Yan^e, Kailin Wu^f

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

^{d-f}Nanjing University, Nanjing, China

Abstract. Geoparks are special areas combining geological and geomorphological features with cultural and environmental components such as geotourism, scientific and educational activities, and local economic development. This research adopts a comparative case study methodology to analyze the management structures, geotourism strategies and conservation outcomes of geoparks in China and Russia, two countries with contrasting political, cultural and environmental contexts. By examining historical trajectories, policy architectures and socio-economic dynamics, the paper identifies systemic similarities, such as the integration of geoparks into UNESCO Global Geopark networks, and key differences, including the centralized, state-led management model in China compared to the decentralized, regionally adaptive approach in Russia. While China's top-down management system delivers rapid infrastructure development and standardized conservation practices, it faces challenges of over-commercialization and environmental fragmentation. In contrast, Russian geoparks benefit from local decision-making but face funding inconsistencies. Comparing the geotourism and geopark systems in China and Russia the paper describes best practices and lessons learned that can be applied to enhance geotourism and conservation efforts in both countries.

Keywords: geotourism, geopark, conservation, Russia, China

For citation: Gantimurova S.A., Karaeva A.K., Slyadnev E.A., Zhang Y., Yan Y., Wu K. Comparison of geopark management systems and development strategies in China and Russia. *Earth sciences and subsoil use*. 2025;48(2):146-159. <https://doi.org/10.21285/2686-9993-2025-48-2-146-159>. EDN: PFDPVE.

ГЕОЭКОЛОГИЯ

Обзорная статья

УДК 502.4

Сравнение систем управления и стратегий развития геопарков в Китае и России

С.А. Гантимурова^a, А.К. Караева^b, Е.А. Сляднев^c, Ю. Чжан^d, Ю. Янь^e, К. У^f

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

^{d-f}Нанкинский университет, Нанкин, Китай

Резюме. Геопарки представляют собой особые территории, на которых геологические и геоморфологические объекты сочетаются с культурными и экологическими компонентами: геотуризмом, научно-просветительской деятельностью и развитием местной экономики. В ходе проведенного исследования был применен метод сравнительного анализа структур управления, стратегий геотуризма и результатов создания геопарков в Китае и России – двух странах с контрастными политическими, культурными и экологическими контекстами. На основе изучения исторических траекторий, политической и социально-экономической динамики в статье определены системные сходства, такие как интеграция геопарков в глобальные сети геопарков ЮНЕСКО, и ключевые различия, включающие централизованную государственную модель управления Китая по сравнению с децентрализованным регионально-адаптивным подходом России. Хотя нисходящая система управления Китая обеспечивает быстрое развитие инфраструктуры и стандартизацию природоохранных методов, она подразумевает наличие таких проблем, как чрезмерная коммерциализация и интенсивная антропогенная нагрузка на окружающую среду. Локализованное принятие решений в России, напротив, подразумевает выгоду в отношении развития геопарков, но в то же время влечет за собой непоследовательность финансирования. В представленной работе на примере сравнения геотуризма и системы геопарков в Китае и России освещен



передовой опыт и извлеченные уроки, которые могут быть применены для развития геотуризма и природоохранных систем в обеих странах.

Ключевые слова: геотуризм, геопарк, охрана окружающей среды, Россия, Китай

Для цитирования: Гантимурова С.А., Караева А.К., Сляднев Е.А., Чжан Ю., Янь Ю., У К. Сравнение систем управления и стратегий развития геопарков в Китае и России // Науки о Земле и недропользование. 2025. Т. 48. № 2. С. 146–159. <https://doi.org/10.21285/2686-9993-2025-48-2-146-159>. EDN: PFDPVE.

Introduction

Geological and geomorphological features have historically been viewed as less fragile than other environmental values, receiving less attention from conservationists compared to cultural and biological heritage [1]. Geological tourism (geotourism) is a relatively young branch of research. However, with increasing awareness of the importance of preserving geological sites, there is growing interest in promoting geotourism as a sustainable form of tourism that benefits both local communities and the environment.

In some regions, Earth's dynamic processes are so well represented that they function as natural "temples" or open-air museums. These sites are termed geoheritage. The preservation of geoheritage, coupled with its use for scientific education and public engagement, is the core mission of geoparks. The late 20th century saw the emergence of geoparks as a response to the need for integrated conservation strategies that extend beyond traditional protected areas. Unlike national parks or UNESCO World Heritage Sites, geoparks adopt a bottom-up approach, involving local communities in decision-making and emphasizing the interconnectedness of geological, ecological, and cultural assets [2].

The development of geoparks represents a transformative approach to safeguarding geological heritage while fostering sustainable socio-economic growth [3]. For years, people loved visiting geological features such as mountains and caves but did not think they needed saving like forests or historic sites. After all, how fragile can a mountain be? Modern geoparks changed the game. UNESCO stepped in with a simple idea: save these places, teach people about them, and use tourism to boost local economies. Imagine a park where you hike through a canyon and learn how it formed millions of years ago – that is a geopark. Scientists now see that "geodiversity" – the variety of landscapes and rocks – is as vital as biodiversity. Think of it like this: without unique geology, we would not have the ecosys-

tems or cultures we cherish today [1]. Geoparks are designated areas that use geoconservation, education and sustainable tourism to protect geological heritage, raise public awareness of the Earth's history and support local economies through responsible geotourism¹.

There are a number of research concerning the establishment and the maintenance of geoparks in China, as well as some papers describing the concepts of planning and development geoparks on the territory of Russia. However, comparative case studies between the two countries remain scarce. The authors argue that such analyses could yield valuable insights into understanding geotourism and conservation practices on an international scale.

China commences ground-breaking initiatives to incorporate sustainable development with geological conservation in response to UNESCO's establishment of the Global Geoparks Network in the early 2000s [4]. First national geopark in China – Zhangjiajie Sandstone Peak Forest Geopark, was established in 2001 in response to the global movement towards geoconservation and the country's recognition of its exceptional geological heritage [5]. Over the years, the geopark concept gained momentum, supported by government policies that linked geological conservation to regional economic growth [6]. By 2020, China had established more than 200 national geoparks and 41 UNESCO Global Geoparks, cementing its position as a global leader in this field¹ [7].

In Russia, the history of the emergence of geoparks began with the development of environmental protection activities and geology. However, Russia followed the path of creating national parks and specially protected natural areas, as in the United States, where geoparks still do not exist. With the creation of the Geological Committee in 1882, a systematic study of the geological structure of the country's territory began. During the work of the committee, discoveries of unique geological objects were made, geological maps

¹ UNESCO global geoparks. *En.unesco.org*. Available from: <https://en.unesco.org/global-geoparks> [Accessed 22th April 2025].



were created, and geological surveys were conducted to detect mineral deposits. However, in Soviet times, priority was given to the economic development of the state, geological exploration and mining prevailed over environmental protection. It was only in the second half of the 20th century, with the growth of environmental awareness and the development of international programs such as the UNESCO Geoparks network, that ideas about the creation of protected geological areas began to take shape in Russia. The turning point was the post-Soviet period, when in the 1990s Russia faced the need to rethink approaches to natural resource management. In the 2000s, the country began to integrate into international initiatives. The first significant step was the inclusion of the Yangan-Tau Geopark in Bashkortostan in the UNESCO Global Geoparks Network in 2017. This event was the result of many years of work by local authorities, scientists, and the Russian Geographical Society, who have been promoting the idea of preserving geological heritage since the late 1990s².

The organisation of geoparks in Russia took place in stages and depended on the interaction of the state, the scientific community, and local initiatives. The process began with the identification of unique geological objects. The All-Russian Research Geological Institute played a key role by systematising data on almost 3,000 geological natural monuments. For example, in Bashkortostan, the Yangan-Tau Geopark was established around such sites as the Mechetlino open-pit mine and Mount Yangan-Tau, which are of international significance. The establishment of a geopark required not only a scientific justification but also a sustainable development plan. In the case of Yangan-Tau, the regional branch of the Russian Geographical Society was actively involved in defining the boundaries and preparing the application to UNESCO.

However, in Russia this process has its own characteristics, historical background and challenges. Based on the analysis of available information, key moments in the history of the creation of geoparks in Russia, as well as problems associated with their organization and regulation, are highlighted. The purpose of given research is to analyse and synthesize similarities and differ-

ences across the two countries geological tourism and conservation systems.

Materials and methods

Data were analysed through two primary sources: policy documents (national and regional legislation, UNESCO reports, and geopark management plans) and field observations collected during site visits to UNESCO-designated geoparks in South China, focusing on infrastructure and conservation practices.

This study uses a comparative case study design [8] to analyse the development and management of geoparks in China and Russia. A qualitative comparative analysis approach is particularly suited to systematically explore the contextual factors and sociocultural dynamics that influence geopark management, allow researchers to identify similarities and differences in institutional structures, stakeholder engagement, and conservation strategies across the two countries.

Comparative analysis is to highlight that distinctions in cultural and historical values, public engagement and policy implementation among studied countries affect nature conservation approaches and geopark system development. For instance, China's emphasis on harmony between humans and nature contrasts with Russia's focus on scientific rigor inherited from Soviet-era practices [9]. Cases were selected based on their designation as UNESCO Global Geoparks, ensuring alignment with international standards.

Results and discussion

Authors examined geoparks of southeastern China that were visited during the field trip in November 2024.

Changxing Geopark. Changxing Geopark in China contains sections that have been designated as Global Stratotype Section and Point. This location is of particular significance because it marks the global boundary between the Permian and Triassic periods, also known as the "Great Dying", which occurred about 252 million years ago [10]. Visitors can see the Permian zone, composed of dolomites and mudstones, and the Triassic zone, composed of limestones (Fig. 1). This boundary not only marks the transition between two geological periods, but also separates

² Russian National Committee for International Geoscience Programme (IGCP). *Igcpc.ru*. Available from: <http://igcpc.ru> [Accessed 22nd April 2025] / Российский комитет Международной программы ЮНЕСКО по геонаукам и геопаркам. Часть 4. Международная программа по геонаукам (МПГК) // *Igcpc.ru*. Режим доступа: <http://igcpc.ru> (дата обращения: 22 апреля 2025).



Fig. 1. Permian-Triassic boundary on the territory of the Changxing Geopark (photo by authors)
Рис. 1. Граница перми и триаса на территории геопарка Чансин (фото авторов)

the Paleozoic from the Mesozoic. This region contains well-preserved stratigraphic layers that contain critical information about the climate and environmental conditions of the ancient Earth³. The geopark serves as a research base for geologists and paleontologists. Various studies are conducted here, aimed at studying paleoclimatic changes, ancient ecosystems and extinction dynamics. The territory is represented by a park zone, which allows for the effective demonstration of unique geological features. It includes information stands (Fig. 2), exhibition spaces that help to study and improve the understanding of the significance of geological processes of the population to increase public awareness and interest.

Qiyun Mountains National Geological Park. The Qiyun Mountains National Geological Park, located in Huangshan City, Anhui Province, is a natural and cultural heritage site.

This park is famous for its unique Danxia geomorphology type found in China (Fig. 3). Red sandstones and conglomerates mainly of Cretaceous age form the Danxia relief. The relief is very similar to karst relief, which is formed in areas underlain by limestone, but since the rocks that form Danxia are sandstones and conglomer-



Fig. 2. Information stand on the territory of the Changxing Geopark (photo by authors)
Рис. 2. Информационный стенд на территории геопарка Чансин (фото авторов)

³ China has received two more "Golden nails". *Ammonit.ru*. Available from: <https://www.ammonit.ru/new/686.htm> [Accessed 22th April 2025] / Китай получил еще два «золотых гвоздя» // *Ammonit.ru*. Режим доступа: <https://www.ammonit.ru/new/686.htm> (дата обращения: 22 апреля 2025).



ates, they are called “pseudokarst” reliefs. They were formed by endogenous (including uplift) and exogenous forces (including weathering and erosion). The geopark has developed infrastructure for tourists, including trails, observation platforms and information stands. The park is of particular interest for the study of geology.

Huangshan World Geopark. Huangshan World Geopark is located in Huangshan City, Anhui Province, China. The park is famous for its granite terrain with sharp peaks. In 1990, this area was included in the list of UNESCO natural sites. The main geological characteristic of this area is granite formations formed from magma solidified underground millions of years ago [11]. The Huangshan Mountains show the effects of tectonic movements that contribute to the formation of the mountain range and pronounced fault structures (Fig. 4).

The relief of Huangshan was formed largely under the influence of erosion and weathering

processes acting on granite formations. In addition, the main geomorphological characteristics were formed in the Pleistocene and are due to the action of glaciers. These processes contribute to the formation of characteristic geological structures. The study of these processes is of considerable scientific interest. Despite the remoteness of the territory, the geopark has a well-developed infrastructure. There are designed walking trails with recreation areas, as well as lifts, which makes tourism in this area easy and accessible (Fig. 5).

Luhe Geological Park. Luhe Geological Park, located in Luhe County of Guangdong Province, China, is a significant geological and natural heritage site.

The volcanic group in the Luhe area of Nanjing is very dense, there are as many as 25 large and small volcanoes, and the ancient Guizishan volcano is one of them, and the eruption time is the Pliocene of the Neogene (5 million years ago),

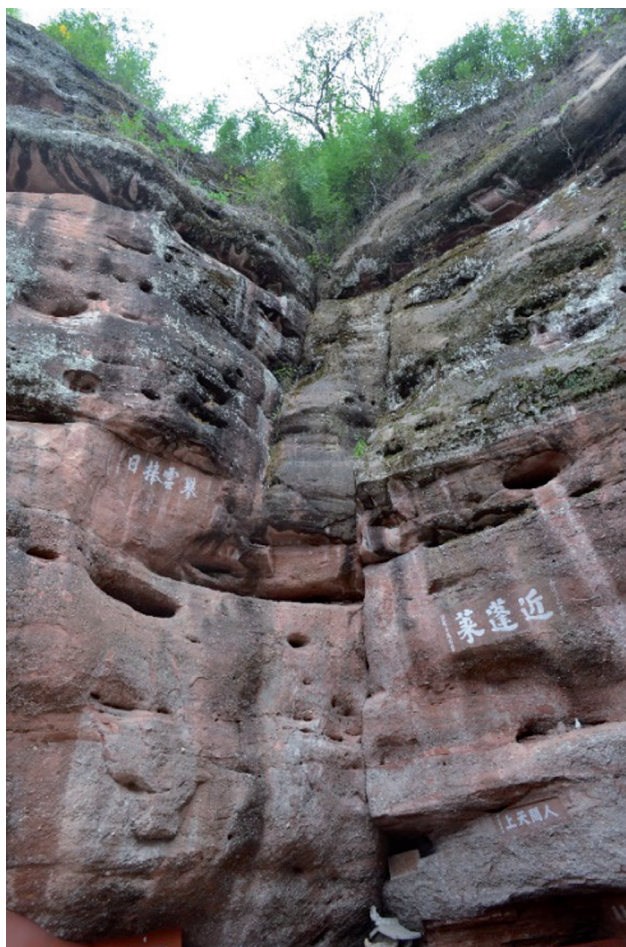


Fig. 3. Danxia relief of the Qiyun Mountains National Geological Park (photo by authors)

Рис. 3. Рельеф Данься в геопарке Горы Циюнь (фото авторов)

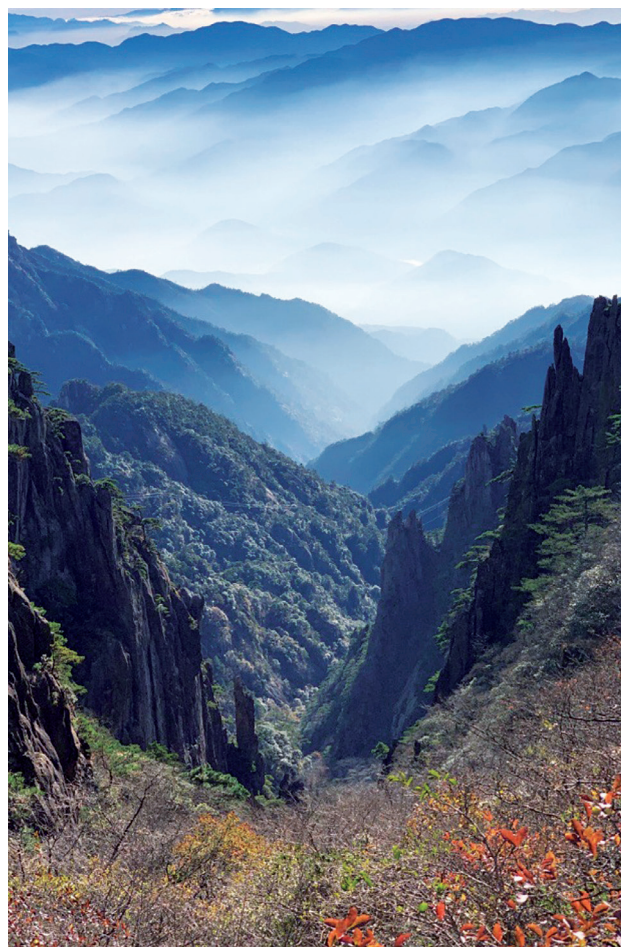


Fig. 4. Fault structures of the Huangshan UNESCO Global Geopark (photo by authors)

Рис. 4. Структуры разломов в геопарке Хуаншань (фото авторов)



Fig. 5. Hiking trail to the peak of the Huangshan UNESCO Global Geopark (photo by authors)
Рис. 5. Пешеходная тропа к вершине в геопарке Хуаншань (фото авторов)

at the same time, the most powerful subduction movements occurred. The heat release during the eruption was uneven, so the structure was formed columnar and fan-shaped; the basalt columns have regular pentagonal and hexagonal shapes (Fig. 6). The park is equipped with trails and observation decks.

In the Russian Federation, the development of geotourism lags behind global trends, being, like ecotourism, at the initial stage of development. There are five geoparks on the territory of Russia: "Altai", "Baltic-Ladoga Clint", "Toratau", "Undoria" and UNESCO Global Geopark "Yangan-Tau".

Toratau Geopark. The Toratau Geopark is located at the junction of the southern Ural Mountains and the eastern edge of the East European Platform, in the Republic of Bashkortostan. The territory is rich in unique geological objects. It is a candidate for inclusion in the UNESCO Global Geoparks network. The territory of the Geopark includes the Usolka and Dalniy Tyulkas geological sections, the only "Golden nails" in Russia. These sections serve as an international standard for describing similar sections in other countries.

In 2019, the International Commission officially recognized the Usolka section on Stratigraphy as the first "Golden nail" of the International Stratigraphic Chart in Russia. The standard of the Sakmarian stage of the Permian system of the ISS, an additional standard (paralimitotype) of the Asselian stage of the Permian, a candidate for the "Golden nails" of the Gzhelian stage and one of the best sections of the lower boundary of the Kasimov stage of the Carboniferous in the world. Scientists have proven that these rocks were formed 294 million years ago, and can now serve as a standard when describing similar objects in other regions and countries. The Usolka geological section is composed of terrigenous-carbonate rocks with interlayers of volcanic tuffs and numerous skeletal remains of various animals⁴.

The Dalniy Tyulkas section is represented by a powerful series of terrigenous-carbonate rocks (siltstones, sandstones, limestones) of the Sakmarian and Artinskian stages of the Permian with interlayers of volcanic tuffs (Fig. 7)⁵.

Yangan-Tau Geopark. Yangan-Tau Geopark, the first UNESCO Global Geopark in Russia

⁴ Tourist guide to Bashkortostan. *Visit-bashkortostan.ru*. Available from: <https://visit-bashkortostan.ru> [Accessed 22th April 2025] / Туристический путеводитель по Башкортостану // *Visit-bashkortostan.ru*. Режим доступа: <https://visit-bashkortostan.ru> (дата обращения: 22 апреля 2025).

⁵ Geopark "Toratau". *Geopark-toratau.ru*. Available from: <https://geopark-toratau.ru> [Accessed 22th April 2025] / Геопарк «Торатау» // *Geopark-toratau.ru*. Режим доступа: <https://geopark-toratau.ru> (дата обращения: 22 апреля 2025).



Fig. 6. Luhe Geopark columnar fault formed as a result of a volcanic eruption (photo by authors)

Рис. 6. Столбчатый разлом в геопарке Лухэ, образовавшийся в результате извержения вулкана (фото авторов)

(designated in 2017), is renowned for its extraordinary geological and cultural heritage (Fig. 8). At its heart lies Mount Yangan-Tau, a rare “warm mountain” where natural thermal vents release steam and gases up to 150 °C, caused by exo-

thermic reactions in Permian-era bituminous limestone – a phenomenon unique to Eurasia [12]. The park also preserves Devonian fossilized coral reefs (380 million years old) and the globally significant Mechetlino Section, which



Fig. 7. Dalniy Tyulkas geological section in the Toratau Geopark as a standard (“golden nail”) of the lower boundary of the Artinskian stage of the Permian system of the International Stratigraphic Chart⁶

Рис. 7. Геологический разрез Дальний Тюлькас в геопарке Торатау – эталон (“золотой гвоздь”) нижней границы артинского яруса пермской системы Международной стратиграфической карты⁶

⁶ Usolka geological section. *Visit-bashkortostan.ru*. Available from: <https://visit-bashkortostan.ru/geologicheskij-razrez-usolka> [Accessed 22th April 2025] / Геологический разрез Усолка // *Visit-bashkortostan.ru*. Режим доступа: <https://visit-bashkortostan.ru/geologicheskij-razrez-usolka> (дата обращения: 22 апреля 2025).



reveals critical layers from the Permian-Triassic mass extinction. Culturally, the mountain holds sacred status for the indigenous Bashkir people, who associate its warmth with spiritual forces, while nearby Bronze Age burial mounds and medieval settlements reflect millennia of human-nature interaction. The geopark pioneers sustainable geotourism through educational trails (e. g., “Path of Ancient Seas”) and collaborates with local Bashkir communities, who lead tours sharing traditional ecological knowledge⁷.

Main advantages of geopark governance in China are centralized coordination and strategic integration. China’s geopark governance framework is distinguished by its top-down model, which has facilitated rapid institutionalization and standardized conservation practices [13]. “The top tier is the National Forestry and Grassland Administration, the second is the provincial Department of Forestry and Grassland, the third is the municipal people’s government of Forestry and Grassland, the fourth is the geopark administrative committee, and the fifth is the geopark management bureau, which is responsible for geoparks. The government has a crucial role

in decision-making and management of the geoparks, which is most likely, the main difference between Chinese geoparks and any other geopark in the world” [14]. The integration of geoparks into national ecological civilization policies and UNESCO Global Geopark networks has enabled cohesive resource allocation and regulatory enforcement. For instance, the Zhangjiajie UNESCO Global Geopark exemplifies China’s success in leveraging centralized governance to balance tourism development with geological preservation, supported by strict zoning regulations and state-funded infrastructure [14]. The government’s emphasis on “ecological red lines” – legally binding boundaries to protect critical habitats – has further strengthened conservation outcomes [15]. Additionally, China’s ability to synergize geoparks with cultural heritage, such as the Huangshan Geopark, which intertwines geological wonders with UNESCO World Heritage status, underscores its holistic approach to geotourism. Stakeholder collaboration between central ministries, local governments, and academic institutions has also fostered innovation in geo-education and community engagement.



Fig. 8. Yangan-Tau Geopark scenic area⁸
Рис. 8. Живописный район геопарка Янган-Тай⁸

⁷ Yangan-Tau UNESCO Global Geopark. *Globalgeopark.org*. Available from: <http://www.globalgeopark.org/GeoparkMap/geoparks/Russian> [Accessed 22th April 2025].

⁸ 7th BSEC month of culture. *Icbss.org*. Available from: <https://icbss.org/event/monuments-russia-2023> [Accessed 22th April 2025].



The main challenge in geopark development is balancing growth and sustainability. That means ensuring that geoparks not only thrive economically but also preserve their unique geological and cultural heritage [13]. Despite progress, China's geoparks face persistent issues, including over-commercialization, environmental degradation, and uneven regional development. Early phases of geopark expansion prioritised economic gains, leading to issues like overcrowding and habitat fragmentation in sites such as the Shilin Stone Forest Geopark, where unregulated tourism imperils karst ecosystems [16]. Furthermore, overlapping administrative jurisdictions – such as conflicts between forestry, tourism, and environmental agencies – have occasionally resulted in fragmented governance. As a result, overall progress in environmental conservation may be significantly hampered [17].

Russian geoparks creation was associated with the global UNESCO initiative to develop a network of geoparks, launched in 1998. However, in Russia this process has its own characteristics and historical background. Initially, Russia followed the path of creating national parks, like the United States, where geoparks do not exist to this day. The UNESCO International Geosciences and Geoparks Programme was adopted at the 38th session of the UNESCO General Conference in November 2015. To coordinate Russia's activities in creating geoparks, by order of the Minister of Foreign Affairs of the Russian Federation S.V. Lavrov on April 25, 2018 approved the Russian Committee of the UNESCO International Geosciences and Geoparks Programme under the Commission of the Russian Federation for UNESCO, under the Earth Sciences Department of the Russian Academy of Sciences². Then, in parallel with the policy of national parks, geoparks began to be created.

Russia faced numerous challenges, beginning with financial constraints. At the initial stages, projects relied heavily on state support, but post-Soviet budgetary cuts to geology – such as reductions of 5–6 times in Yakutia – severely limited opportunities for development. Compounding this was the lack of a clear legislative framework: geoparks lacked a defined legal status as protected areas, unlike national parks or nature reserves, which hindered effective management and protection. Competition with subsoil use further complicated efforts, as geologically valuable areas often overlapped with resource extraction sites. For instance, in 2010, the Ministry of Eco-

nomic Development raised concerns that establishing entities like Rosgeology could disrupt competition in the subsoil sector. Additionally, Russia lagged behind China in expertise and awareness, lacking specialists in geotourism and sustainable development, which had been actively cultivated elsewhere since the 2000s.

After geoparks were established, new challenges emerged. Management and control became fragmented due to the absence of a centralized governing body, forcing responsibility onto local authorities with limited resources – unlike centralized systems in China. Financial self-sufficiency also proved difficult, as transitioning from state funding to tourism-driven revenue was hampered by underdeveloped geotourism and ineffective marketing strategies, leaving many geoparks financially unsustainable. Balancing preservation and use remained contentious, with excessive tourism posing risks to fragile geological sites, a problem noted globally. Finally, despite participation in UNESCO programs, Russia's limited integration into international networks hindered knowledge and resource exchange, restricting the growth of new geoparks.

According to the article by E.V. Luneva, there are four ways of geoparks organization in Russia [18]. The first way is its recognition as a tourist and recreational zone, within the boundaries of which specially protected natural areas (SPNA) are located with the preservation of their legal regime, as well as other natural, cultural and recreational objects. According to this type, the Altai Geopark was created in 2015. The second way of geopark organization is a geopark without the legal regime of a tourist and recreational zone and without the legal regime of a SPNA, when SPNA, geological and other natural objects, cultural heritage objects, etc. are located within its boundaries. The Yangan-Tau Geopark was created according to this model based on the order of the Government of the Republic of Bashkortostan on July 10, 2020, at the 209th session of the UNESCO Executive Board, the Yangan-Tau Geopark received the status of a UNESCO Global Geopark⁷. The third way is a geopark with the legal status of a protected area in the form of a state paleontological, mineralogical or geological reserve. This is currently the case with the Undoria regional geopark, which was created in 2018 [19].

The fourth type of organization of geopark, possible within the framework of the current legislation, is a geopark as an independent cat-



egory of protected area, introduced by regional regulatory legal acts. In order to eliminate legal uncertainty, to normatively consolidate the legal regime of such a category of protected area as a geopark, on September 22, 2022, the State Assembly of the Republic of Bashkortostan adopted the Law of the Republic of Bashkortostan "On Geoparks in the Republic of Bashkortostan". The draft Law of the Republic of Bashkortostan on Geoparks establishes the concept of "geopark", regulates the procedure for creating geoparks in the Republic of Bashkortostan and approving their boundaries, defines the main tasks and areas of activity for the development of geoparks, and also provides for the implementation of state support for the development of geoparks and their management.

In many countries, geoparks are part of protected areas and are their structural units. The Russian law on protected areas does not provide for such a category as a geopark, but allows for the organization of "other" nature conservation categories. In order to expand the network of geoparks in Russia, changes are needed in the regulatory framework in terms of defining the concept of a "geopark" as a special territory [20].

The notable gap in geopark numbers between China and Russia arises from a mix of factors, including geological resources, government approaches, economic conditions, and cultural perspectives. By tying geoparks to national economic plans, China has funded infrastructure, marketing, and local training, transforming sites into popular destinations that balance tourism revenue with heritage preservation. Russia, despite its vast landscapes and unique features like Yangan-Tau's thermal mountain or critical fossil sites, faces hurdles. Remote areas like Siberia deal with extreme climates and limited access, making large-scale tourism difficult to sustain.

Policy priorities further widen this gap. China's centralized strategy integrates geoparks into broader goals for sustainable growth, backed by UNESCO partnerships that boost global recognition and funding. Russia, however, has traditionally focused on strict nature reserves, prioritizing ecological protection over geotourism. Bureaucratic challenges and fragmented governance – holdovers from the Soviet era – often side-line local communities, clashing with UNESCO's emphasis on grassroots involvement. Culturally, China's philosophical traditions, which emphasize

harmony with nature, align neatly with geopark ideals, fuelling public interest through schools and media. Russia's conservation efforts, while scientifically rigorous, tend to overlook public engagement, leaving initiatives like Yangan-Tau's thermal tours niche and academic.

Economically, China's targeted investments in rural tourism – roads, visitor centres, digital campaigns – draw millions of visitors to its geoparks, creating jobs for local citizens and revitalizing regions. Russia's underfunded tourism sector, especially in remote areas, faces challenges due to seasonal closures and sparse infrastructure. Limited accessibility and a lack of touristic facilities allow only small groups of people to visit some nature sites, mostly for scientific purposes.

Conclusion

The main goal of the Global Geoparks program is to create a model of sustainable economic development of the territory based on the use of geological objects of international significance in their direct connection with nature, culture and other aspects of people's lives.

With a balanced combination of conservation, community engagement, and education, China's creative approach to geotourism and geopark development offers valuable insights. The primary goal is to preserve distinctive geological and geographical features, such as fossil sites and karst landscapes, which are explored and proven to attract geotourists. This strategy is strengthened by active community involvement, especially locals, in decision-making and economic activities development. By combining science, tradition and innovation, China's model demonstrates how geoparks can thrive as dynamic spaces.

Russian geoparks have deep historical roots dating back to the early days of geological science, but their development as organized entities are relatively recent, driven by international trends. The main challenges – lack of funding, weak legislation, conflict with subsoil use, and management difficulties – are holding back the process. However, the success of Yangan-Tau and interest in new projects such as Toratau demonstrate Russia's potential in this area. Overcoming these challenges requires a unified government policy, active involvement of the scientific community, and the development of geotourism as an economically sustainable model. Today Russia is at an early stage of forming its geopark network, and the future depends on how these challenges are addressed.



References

1. Farsani N.T., Coelho C.O.A., Costa C.M.M., Amrikazemi A. Geo-knowledge management and geoconservation via geoparks and geotourism. *Geoheritage*. 2014;6:185-192. <https://doi.org/10.1007/s12371-014-0099-7>.
2. Mc Keever P.J., Zouros N., Patzak M., Weber J. The UNESCO global network of national geoparks. In: Newsome D., Dowling R.K. (eds). *Geotourism: the tourism of geology and landscape*. Oxford: Goodfellow Publishers; 2010, p. 221-230. <https://doi.org/10.23912/978-1-906884-09-3-1071>.
3. Ha P.V., Van T.T., Tin Q.D., Hieu H.H., Tuan N.D., Hung N.Q. Geoheritage values of the Dong Van Karst Plateau Geopark: a quantitative geomorphological and topographic analysis. *Bulletin of the Geological Society of Malaysia*. 2013;59:13-17. <https://doi.org/10.7186/bgsm59201303>.
4. Zouros N. The European geoparks network. Geological heritage protection and local development. *Episodes*. 2004;27(3):165-171. <https://doi.org/10.18814/epiugs/2004/v27i3/002>.
5. Chen A., Lu Y., Ng Y.C.Y. *The principles of geotourism*. Berlin: Springer; 2015, 264 p. <https://doi.org/10.1007/978-3-662-46697-1>.
6. Wang L., Tian M., Wang L. Geodiversity, geoconservation and geotourism in Hong Kong Global Geopark of China. *Proceedings of the Geologists' Association*. 2015;126(3):426-437. <https://doi.org/10.1016/j.pgeola.2015.02.006>.
7. Gou G.R., Fang W., Cheung L.T.O., Fok L., Chow A.S.Y., Zhang K. Understanding the determinants of geologically responsible behaviour among geotourists: a multi-destination analysis. *Tourism and Hospitality*. 2024;5(1):1-15. <https://doi.org/10.3390/tourhosp5010001>.
8. George A.L., Bennett A. Case studies and theory development in the social sciences. In: Arjona A., Pearlman W. (eds). *Perspectives on politics*. American Political Science Association; 2007, vol. 5, iss. 1, p. 187-188. <https://doi.org/10.1017/S1537592707070491>.
9. Fassoulas C., Mouriki D., Dimitriou-Nikolakis P., Iliopoulos G. Quantitative assessment of geotopes as an effective tool for geoheritage management. *Geoheritage*. 2012;4:177-193. <https://doi.org/10.1007/s12371-011-0046-9>.
10. Yin H., Zhang K., Tong J., Yang Z., Wu S. The global stratotype section and point (GSSP) of the Permian-Triassic boundary. *Episodes*. 2001;24(2):102-114. <https://doi.org/10.18814/epiugs/2001/v24i2/004>.
11. Chu Y. Utilization and protection of the world heritage – mixed property in Huangshan mount. *Applied and Computational Engineering*. 2023;3(1):356-361. <https://doi.org/10.54254/2755-2721/3/20230548>.
12. Farkhutdinov I.M., Farkhutdinov A.M., Ismagilov R.A. Geological structure of the Yangan-Tau geopark. *Vestnik Bashkirskogo universiteta*. 2018;23(4):1128-1138. (In Russ.). EDN: YUXOJN.
13. Zhuang A., Stoffelen A., Meijles E., Groote P. The complex governance of protected areas: insights from geoheritage and geopark management in China. *Environmental Policy and Governance*. 2024;34(6):679-690. <https://doi.org/10.1002/eet.2118>.
14. Xu K., Wu W. Geoparks and geotourism in China: a sustainable approach to geoheritage conservation and local development – a review. *Land*. 2022;11(9):1493. <https://doi.org/10.3390/land11091493>.
15. Xu X., Tan Y., Yang G., Barnett J. China's ambitious ecological red lines. *Land Use Policy*. 2018;79:447-451. <https://doi.org/10.1016/j.landusepol.2018.08.037>.
16. Wu L., Zhang Y., Wang P., Li B., Ye Q., Peng W., et al. Karst geoheritage of the red stone forest in the Xiangxi UNESCO Global Geopark: chromogenic factors, microgeomorphology and dissolution behaviour. *Geoheritage*. 2024;16:18. <https://doi.org/10.1007/s12371-024-00917-1>.
17. He S. The role of communities in the governance of China's national parks and the consolidation and development of their role. *Journal of Natural Resources*. 2024;39:2310. <https://doi.org/10.31497/zrzyxb.20241004>.
18. Luneva E.V. Organization of geoparks in Russia and peculiarities of their legal regime. *Lex Russica*. 2021;74(9):32-43. (In Russ.). <https://doi.org/10.17803/1729-5920.2021.178.9.032-043>. EDN: JQMKUX.
19. Semiletin S.A. UNESCO global geoparks as a driver of tourism development in the mountain territories of the CIS countries. *Dialogue: politics, law, economics*. 2024;1:112-116. (In Russ.). EDN: QOZJGJ.
20. Arutyunyan M.S., Kurbanov D.A., Samigullin R.M. To the issue of normative regulation of the legal regime of geoparks in Russia. *The Rule of Law State: Theory and Practice*. 2023;19(3):120-130. (In Russ.). <https://doi.org/10.33184/pravgos-2023.3.13>. EDN: SHBRTTE.

Список источников

1. Farsani N.T., Coelho C.O.A., Costa C.M.M., Amrikazemi A. Geo-knowledge management and geoconservation via geoparks and geotourism // *Geoheritage*. 2014. Vol. 6. P. 185–192. <https://doi.org/10.1007/s12371-014-0099-7>.
2. Mc Keever P.J., Zouros N., Patzak M., Weber J. The UNESCO global network of national geoparks // *Geotourism: the tourism of geology and landscape* / eds D. Newsome, R.K. Dowling. Oxford: Goodfellow Publishers, 2010. P. 221–230. <https://doi.org/10.23912/978-1-906884-09-3-1071>.
3. Ha P.V., Van T.T., Tin Q.D., Hieu H.H., Tuan N.D., Hung N.Q. Geoheritage values of the Dong Van Karst Plateau Geopark: a quantitative geomorphological and topographic analysis // *Bulletin of the Geological Society of Malaysia*. 2013. Vol. 59. P. 13–17. <https://doi.org/10.7186/bgsm59201303>.
4. Zouros N. The European geoparks network. Geological heritage protection and local development // *Episodes*. 2004. Vol. 27. Iss. 3. P. 165–171. <https://doi.org/10.18814/epiugs/2004/v27i3/002>.
5. Chen A., Lu Y., Ng Y.C.Y. *The principles of geotourism*. Berlin: Springer, 2015. 264 p. <https://doi.org/10.1007/978-3-662-46697-1>.



6. Wang L., Tian M., Wang L. Geodiversity, geoconservation and geotourism in Hong Kong Global Geopark of China // *Proceedings of the Geologists' Association*. 2015. Vol. 126. Iss. 3. P. 426–437. <https://doi.org/10.1016/j.pgeola.2015.02.006>.
7. Gou G.R., Fang W., Cheung L.T.O., Fok L., Chow A.S.Y., Zhang K. Understanding the determinants of geologically responsible behaviour among geotourists: a multi-destination analysis // *Tourism and Hospitality*. 2024. Vol. 5. Iss. 1. P. 1–15. <https://doi.org/10.3390/tourhosp5010001>.
8. George A.L., Bennett A. Case studies and theory development in the social sciences // *Perspectives on politics* / eds A. Arjona, W. Pearlman. American Political Science Association, 2007. Vol. 5. Iss. 1. P. 187–188. <https://doi.org/10.1017/S1537592707070491>.
9. Fassoulas C., Mouriki D., Dimitriou-Nikolakis P., Iliopoulos G. Quantitative assessment of geotopes as an effective tool for geoheritage management // *Geoheritage*. 2012. Vol. 4. P. 177–193. <https://doi.org/10.1007/s12371-011-0046-9>.
10. Yin H., Zhang K., Tong J., Yang Z., Wu S. The global stratotype section and point (GSSP) of the Permian-Triassic boundary // *Episodes*. 2001. Vol. 24. Iss. 2. P. 102–114. <https://doi.org/10.18814/epiugs/2001/v24i2/004>.
11. Chu Y. Utilization and protection of the world heritage – mixed property in Huangshan mount // *Applied and Computational Engineering*. 2023. Vol. 3. Iss. 1. P. 356–361. <https://doi.org/10.54254/2755-2721/3/20230548>.
12. Фархутдинов И.М., Фархутдинов А.М., Исмаилов Р.А. Геологическое строение геопарка Янган-Тай // *Вестник Башкирского университета*. 2018. Т. 23. № 4. С. 1128–1138. EDN: YUXOJN.
13. Zhuang A., Stoffelen A., Meijles E., Groote P. The complex governance of protected areas: insights from geoheritage and geopark management in China // *Environmental Policy and Governance*. 2024. Vol. 34. Iss. 6. P. 679–690. <https://doi.org/10.1002/eet.2118>.
14. Xu K., Wu W. Geoparks and geotourism in China: a sustainable approach to geoheritage conservation and local development – a review // *Land*. 2022. Vol. 11. Iss. 9. P. 1493. <https://doi.org/10.3390/land11091493>.
15. Xu X., Tan Y., Yang G., Barnett J. China's ambitious ecological red lines // *Land Use Policy*. 2018. Vol. 79. P. 447–451. <https://doi.org/10.1016/j.landusepol.2018.08.037>.
16. Wu L., Zhang Y., Wang P., Li B., Ye Q., Peng W., et al. Karst geoheritage of the red stone forest in the Xiangxi UNESCO Global Geopark: chromogenic factors, microgeomorphology and dissolution behaviour // *Geoheritage*. 2024. Vol. 16. P. 18. <https://doi.org/10.1007/s12371-024-00917-1>.
17. He S. The role of communities in the governance of China's national parks and the consolidation and development of their role // *Journal of Natural Resources*. 2024. Vol. 39. P. 2310. <https://doi.org/10.31497/zrzyxb.20241004>.
18. Лунева Е.В. Организация геопарков в России и особенности их правового режима // *Lex Russica*. 2021. Т. 74. № 9. С. 32–43. <https://doi.org/10.17803/1729-5920.2021.178.9.032-043>. EDN: JQMKUX.
19. Семилеткин С.А. Глобальные геопарки ЮНЕСКО как драйвер развития туризма на горных территориях стран СНГ // *Диалог: политика, право, экономика*. 2024. № 1. С. 112–116. EDN: QOZJGJ.
20. Арутюнян М.С., Курбанов Д.А., Самигуллин Р.С. К вопросу о нормативном закреплении правового режима геопарков в России // *Правовое государство: теория и практика*. 2023. Т. 19. № 3. С. 120–130. <https://doi.org/10.33184/pravgos-2023.3.13>. EDN: SHBRTE.

Information about the authors / Информация об авторах



Svetlana A. Gantimurova,

Junior Researcher of the Geoinformatics Department,
Siberian School of Geosciences,
Irkutsk National Research Technical University,
Irkutsk, Russia,

✉ lanagant@geo.istu.edu
<https://orcid.org/0009-0005-5978-7869>

Гантимурова Светлана Анатольевна,

младший научный сотрудник департамента геоинформатики,
институт «Сибирская школа геонаук»,
Иркутский национальный исследовательский технический университет,
г. Иркутск, Россия,

✉ lanagant@geo.istu.edu
<https://orcid.org/0009-0005-5978-7869>



Angelina K. Karaeva,

Student,
Siberian School of Geosciences,
Irkutsk National Research Technical University,
Irkutsk, Russia,
linakaraeva@mail.ru

<https://orcid.org/0009-0005-0944-2723>



Караева Ангелина Константиновна,
студент,
институт «Сибирская школа геонаук»,
Иркутский национальный исследовательский технический университет,
г. Иркутск, Россия,
linakaraeva@mail.ru
<https://orcid.org/0009-0005-0944-2723>



Efim A. Slyadnev,
Student,
Siberian School of Geosciences,
Irkutsk National Research Technical University,
Irkutsk, Russia,
effm228550@mail.ru
<https://orcid.org/0009-0006-8809-8277>

Сляднев Ефим Артемович,
студент,
институт «Сибирская школа геонаук»,
Иркутский национальный исследовательский технический университет,
г. Иркутск, Россия,
effm228550@mail.ru
<https://orcid.org/0009-0006-8809-8277>



Yongzhan Zhang,
Ph.D., Professor,
School of Geography & Ocean Science,
Nanjing University,
Nanjing, China,
zhangyzh@nju.edu.cn
<https://orcid.org/0000-0003-1118-8697>

Чжан Юнчжань,
доктор наук, профессор,
Школа географии и океанологии,
Нанкинский университет,
г. Нанкин, Китай,
zhangyzh@nju.edu.cn
<https://orcid.org/0000-0003-1118-8697>



Yulan Yan,
Student,
School of Geography & Ocean Science,
Nanjing University,
Nanjing, China.

Янь Юйлань,
студент,
Школа географии и океанологии,
Нанкинский университет,
г. Нанкин, Китай.



Kailin Wu,
Student,
School of Geography & Ocean Science,
Nanjing University,
Nanjing, China.

У Кайлинь,
студент,
Школа географии и океанологии,
Нанкинский университет,
г. Нанкин, Китай.



Contribution of the authors / Вклад авторов

Svetlana A. Gantimurova – conceptualization, methodology, investigation, writing – original draft, writing – editing.

Angelina K. Karaeva – investigation, writing – original draft, visualization.

Efim A. Slyadnev – investigation, writing – original draft.

Yongzhan Zhang – data curation, project administration, resources.

Yulan Yan – investigation.

Kailin Wu – investigation.

С.А. Гантимурова – разработка концепции, разработка методологии, проведение исследования, написание черновика рукописи, редактирование рукописи.

А.К. Караева – проведение исследования, написание черновика рукописи, визуализация.

Е.А. Сляднев – проведение исследования, написание черновика рукописи.

Ю. Чжан – курирование данных, административное руководство исследовательским проектом, предоставление ресурсов.

Ю. Янь – проведение исследования.

К. У – проведение исследования.

Conflict of interests / Конфликт интересов

The authors declare no conflicts of interests.

Авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов.

The final manuscript has been read and approved by all the co-authors.

Все авторы прочитали и одобрили окончательный вариант рукописи.

Information about the article / Информация о статье

The article was submitted 30.04.2025; approved after reviewing 30.05.2025; accepted for publication 19.06.2025.

Статья поступила в редакцию 30.04.2025; одобрена после рецензирования 30.05.2025; принята к публикации 19.06.2025.



GEOPHYSICS

Original article

EDN: OTFBNN

DOI: 10.21285/2686-9993-2025-48-2-160-184



Palaeomagnetic correlation of Tunguska syncline traps of Siberian platform with Permian-Triassic global stratotype of Zhejiang Province, Southern China

Konstantin M. Konstantinov^{a,✉}, Mikhail D. Tomshin^b, Innokentiy K. Konstantinov^c,
Anatolii N. Popov^d, Veniamin E. Pozdniakov^e, Shen Yi^f, Ziton Zhou^g

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

^bDiamond and Precious Metal Geology Institute, Siberian Branch of the Russian Academy of Sciences, Yakutsk, Russia

^{f,g}Nanjing University, Nanjing, China

Abstract. The purpose of the International Chinese-Russian Geological Expedition of students and teachers in Nanjing and the Yangtze River Delta (China) from October 26 to November 9, 2024 was to establish common connections and patterns in the geological structure and development of the Siberian and South China platforms. The group visited a number of sites of high scientific importance in order to understand the formation patterns of the modern appearance of East Asia beginning from the Late Permian-Early Triassic period (about 250 million years ago). Based on palaeomagnetic data, it was revealed that at the Permian-Triassic boundary these lithospheric blocks were located more than 1,500 km apart separated by the Mongol-Okhotsk Ocean, which closed at the end of the Early Cretaceous period (about 125 million years ago). That was the time when Siberian platform featured active tectonic and magmatic processes related to the Tunguska syncline trap formation while calm sedimentation of terrigenous-sedimentary strata in marine conditions took place on the South China platform. These geological processes have become the main objects of the research presented in the article. The methodology consisted of collecting and analyzing quantitative data indicating the synchronicity of specified events in time, which will find application in solving a wide range of geological problems including interregional correlations of stratigraphic sections, tectonic-magmatic processes, study of catastrophic phenomena, etc. Materials from paleontological, isotopic, palaeomagnetic and other studies (authors' and published by other researchers) were used as a factual basis. The conducted research has shown that the deposition time of the Katangsky volcanic complex basites of the Tunguska syncline corresponds to the Permian-Triassic boundary of the Meishan section D (Changxing District, Zhejiang Province, South China).

Keywords: Siberian platform, South China platform, Tunguska syncline, Permian period, Triassic period, trap magmatism, palaeomagnetic reconstructions

Funding: The research was conducted within the framework of the cooperation program between the students of Irkutsk National Research Technical University (Russia) and Nanjing University (China) "Baikal – the pearl of the World".

Acknowledgements: The authors would like to express their deep gratitude to the staff of the Siberian School of Geosciences Institute of Irkutsk National Research Technical University: Candidate of Geological and Mineralogical Sciences L.I. Auzina, Scientific Director of the Institute, Candidate of Geological and Mineralogical Sciences A.V. Parshin, Head of the Department of Domestic and Foreign Communications S.A. Khristova, as well as Professor Yongzhan Zhang of Nanjing University for their great assistance provided in conducting international geological expeditions to the lake Baikal and the Yangtze River Delta.

For citation: Konstantinov K.M., Tomshin M.D., Konstantinov I.K., Popov A.N., Pozdniakov V.E., Yi Sh., et al. Palaeomagnetic correlation of Tunguska syncline traps of Siberian platform with Permian-Triassic global stratotype of Zhejiang Province, Southern China. *Earth sciences and subsoil use*. 2025;48(2):160-184. <https://doi.org/10.21285/2686-9993-2025-48-2-160-184>. EDN: OTFBNN.



ГЕОФИЗИКА

Научная статья
УДК 550.838.5

Палеомагнитная корреляция траппов Тунгусской синеклизы Сибирской платформы с глобальным стратотипом пермо-триаса провинции Чжэцзян Южного Китая

К.М. Константинов^{a,✉}, М.Д. Томшин^b, И.К. Константинов^c, А.Н. Попов^d,
В.Е. Поздняков^e, Ш. И^f, Ц. Чжоу^g

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

^bИнститут геологии алмаза и благородных металлов СО РАН, Якутск, Россия

^{f, g}Нанкинский университет, Нанкин, Китай

Резюме. Целью проведения Международной китайско-российской геологической экспедиции в г. Нанкине и дельте реки Янцзы (Китай) в период с 26 октября по 9 ноября 2024 г., состоящей из студентов и преподавателей, являлось установление общих связей и закономерностей в геологическом строении и развитии Сибирской и Южно-Китайской платформ. Группа посетила ряд объектов, имеющих высокое научное значение для понимания формирования современного облика Восточной Азии, начиная с позднепермского-раннетриасового периода (около 250 млн лет). На основе палеомагнитных данных было выявлено, что на границе перми – триаса указанные литосферные блоки были удалены друг от друга на более чем 1500 км. В это время между ними существовал Монголо-Охотский океан, который закрылся в конце раннего мелового периода (около 125 млн лет). В то время на Сибирской платформе протекали активные тектоно-магматические процессы, связанные с формированием траппов Тунгусской синеклизы, а на Южно-Китайской платформе проходило спокойное осадконакопление терригенно-осадочных толщ в морских условиях. Именно эти геологические процессы стали основными объектами представленного в статье исследования. Методика состояла в сборе и анализе количественных данных, свидетельствующих о синхронности указанных событий во времени, которые найдут применение в решении широкого круга таких геологических задач, как межрегиональные корреляции стратиграфических разрезов, тектоно-магматических процессов, изучение катастрофических явлений и др. В качестве фактографической основы были использованы материалы по палеонтологическим, изотопным, палеомагнитным и другим исследованиям (собственные и опубликованные другими авторами). Благодаря проведенному исследованию было показано, что время внедрения базитов катангского вулканического комплекса Тунгусской синеклизы коррелируется с пермо-триасовой границей разреза Мейшань D (округ Чансин, провинция Чжэцзян, Южный Китай).

Ключевые слова: Сибирская платформа, Южно-Китайская платформа, Тунгусская синеклиза, пермский период, триасовый период, трапповый магматизм, палеомагнитные реконструкции

Финансирование: Исследования проведены в рамках программы сотрудничества студентов Иркутского национального исследовательского технического университета (Россия) и Нанкинского университета (Китай) «Байкал – жемчужина Мира».

Благодарности: Авторы выражают огромную благодарность сотрудникам института «Сибирская школа геонаук» Иркутского национального исследовательского технического университета: кандидату геолого-минералогических наук Л.И. Аузиной, научному руководителю института кандидату геолого-минералогических наук А.В. Паршину, руководителю отдела внутренних и внешних коммуникаций С.А. Христовой, а также профессору Нанкинского университета Юнчжань Чжану за огромную помощь, оказанную в проведении международных геологических экспедиций на оз. Байкал и в дельте р. Янцзы.

Для цитирования: Константинов К.М., Томшин М.Д., Константинов И.К., Попов А.Н., Поздняков В.Е., И Ш. [и др.]. Палеомагнитная корреляция траппов Тунгусской синеклизы Сибирской платформы с глобальным стратотипом пермо-триаса провинции Чжэцзян Южного Китая // Науки о Земле и недропользование. 2025. Т. 48. № 2. С. 160–184. <https://doi.org/10.21285/2686-9993-2025-48-2-160-184>. EDN: OTFBNN.

Introduction

At the Permian-Triassic boundary in the Siberian Platform, a unique outpouring of basites (basalts, dolerites, tuffs, etc.) occurred on a unique scale. These rocks of basic composition, called Siberian traps, are now developed mainly within the Tunguska syncline [1–6]. The total thickness of lavas and tuffs here reaches 3000 m in some places. Intrusive traps are predominantly

distributed in the eastern part of the platform in the territory of the Republic of Yakutia, which are represented by extended fields of sills and rare dykes marking zones of large crustal rifts on the eastern margin of the Tunguska syncline, on the southwestern and northeastern slopes of the Anabarsky antecline.

Magmatism began with the introduction of sills and dykes, then intrusive-effusive activity



with the outpouring of a huge volume of lavas, formation of eruptive apparatuses and accumulation of tuffogenic-sedimentary strata becomes the leading one [6, 7]. On the eastern margin of the Tunguska syncline, tiered hypabyssal sills are formed, extending eastwards for many tens and even hundreds of kilometres from the magma-supplying zones. Near the latter, the thickness of sills reaches 500 m with its gradual decrease to 10–15 m at the frontal parts of deposits. Dikes usually represent magma-supply channels and are generally few in number. Multilayered sills with a total thickness of several hundred metres were discovered by drilling along the sides of the syncline in the Paleozoic cover.

The concept of the Siberian traps province includes the area of distribution of close in age magmatic rocks of different composition – from ultrabasic rocks, for example (meimechites), to acidic rocks (rhyolites and granites) [4, 6–10]. Tholeiitic basalts prevail among traps, petrochemical and geochemical features of which are determined by the processes of initial magma formation. Compared to basites of rift zones, they are characterised by reduced and usual for tholeiites contents of TiO_2 , P_2O_5 and high concentrations of Ni and Cg. They are steadily depleted in V, Sr, Ba and B.

The age of trap magmatism of the Siberian Platform, according to geological data, is usually determined as late Permian-early Triassic. K-Ag dating (hundreds of determinations) gives a wide range of values: from 270 to 220 Ma, i. e. from the beginning of the Permian to almost the end of the Triassic. A special geochronological study of traps in the Norilsk region with dating of zircons and study of their paleomagnetism leads to the conclusion that trap magmatism is confined to the Permian-Triassic boundary and lasted less than 1 Ma (almost instantaneous in the geological time scale) [11]. This type of magmatism is best explained by a mantle jet (plume) [7, 12, 13]. According to the data, the Siberian Platform in the late Permian-early Triassic (about 250 Ma) was located in the northern polar region and passed over the Icelandic hot spot (Fig. 1).

The eruption of the Siberian traps was one of the largest terrestrial volcanic eruptions in the Phanerozoic history of the Earth. The total volume of volcanic material is estimated at 2×10^6 – 3×10^6 km³ [11, 14]. As a result of volcanism, which occurred in an exceptionally short time, the SO_2 and volcanic dust (the ash) content in the Earth's atmosphere increased dramatically, leading to acid rain and global climate cooling. The Permian-Triassic boundary in Earth's history is notable for the extinction of many groups of organisms and abrupt changes in global sea level (up to 280 m), which include two periods of abrupt sea regression and two periods of more intense transgression over several million years. These changes are attributed to rapid climate fluctuations due to the increase in polar ice and its subsequent melting.

Active tectono-magmatic operation has determined the metallogeny of the Siberian traps, with which deposits of copper, iron, platinum and other minerals and building materials can be associated.

In this regard, the study of the Siberian traps is of high scientific and applied importance. One of the priority issues is to establish the sequence of formation of basites, which determines the relevance of their comprehensive study. Despite the fact that extensive literature has been devoted to the solution of this question, this problem is still debatable.

Thus, the purpose of our research is to select a basite reference object, relative to which regional correlations of traps of the Tunguska syncline, Norilsk region, Molodo-Popigai fault zone and other tectono-magmatic structures of Western and Eastern Siberia can be made. The main condition for determining such a reference point should be its reliable connection with the global stratotype¹. One of the nearest such objects is the Permian-Triassic terrigenous-sedimentary rock sections in southern China² [17].

According to the palaeogeographic reconstruction (see Fig. 1), in the Early Triassic (approximately 250 Ma), the Siberian, North and South China Platforms were located in the northern hemisphere, but were separated by the Mongolian-Okhotsk palaeo-ocean [15, 16]. At this time, the Siberian Platform

¹ Global Stratotype Section and Point (GSSP – Global Stratotype Section and Point) or “Golden Nail” is an internationally agreed reference point on the stratigraphic section, which defines the lower boundary of the stage on the geochronological scale. The work of defining the GSSP is carried out by the International Commission on Stratigraphy (ICS), part of the International Union of Geological Sciences. Many, but not all, global stratotypes are based on palaeontological variations. For this reason, GSSPs are usually described by reference to transitions between different faunal stages, although many more faunal stages have been described than global stratotypes. Work on defining GSSPs began in 1977. As of 2024, 79 of the 101 tiers that require global stratotypes have a ratified GSSP.

² Murphy M.A., Salvador A. (eds). *International stratigraphic guide: an abridged version*. Moscow: GEOS; 2002, 38 p. (In Russ.) / Международный стратиграфический справочник: сокращенная версия / отв. ред. Ю.Б. Гладенков. М.: ГЕОС, 2002. 38 с.

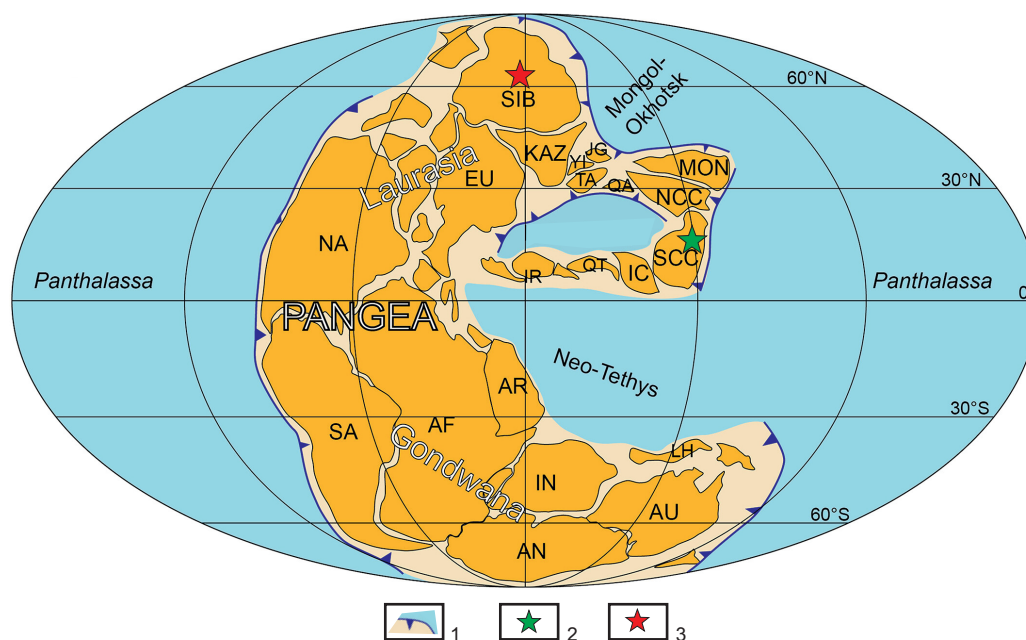


Fig. 1. Paleogeographic reconstruction of the Pangea supercontinent emphasizing the relative position of main blocks in Eastern Asia in the Early Triassic based on palaeomagnetic data [15, 16]:

1 – subduction boundaries; 2, 3 – localization of the studied objects: 2 – Meishan Province, China, 3 – Western Yakutia, Russia

Abbreviations for blocks (using present-day boundaries):

EU – European craton; KAZ – Kazakhstan block; NA – North America; SA – South America; AF – Africa;

IN – India; AN – Antarctic; AU – Australia; AR – Arabian block; IR – Iranian block;

QT – Qiangtang block; IC – Indo-Chinese block; LH – Lhasa block

Рис. 1. Палеогеографическая реконструкция суперконтинента Пангея, подчеркивающая относительное положение основных блоков в Восточной Азии в раннем триасе на основе палеомагнитных данных [15, 16]:

1 – границы субдукции; 2, 3 – положение изученных объектов: 2 – провинция Мейшань, Китай, 3 – Западная Якутия, Россия

Сокращения для блоков (с использованием современных границ):

EU – Европейский кратон; KAZ – Казахстанский блок; NA – Северная Америка; SA – Южная Америка;

AF – Африка; IN – Индия; AN – Антарктика; AU – Австралия; AR – Аравийский блок; IR – Иранский блок;

QT – Цянтанский блок; IC – Индо-Китайский блок; LH – Лхасский блок

was undergoing active trap outpouring associated with the impact of the Icelandic hot spot, and marine sediments were forming on the South China Platform. Clockwise rotation of the Siberian and South China Platforms relative to the North China Platform in the Mesozoic led to the final closure of the Mongolian-Okhotsk Ocean and Paleo-Tethys at the end of the Early Cretaceous (about 125 Ma).

Taking into account the palaeogeographic separation of the regions at the time of formation of the objects under consideration, the main task is to obtain independent isotopic and palaeomagnetic data on the basites of the Siberian Platform and compare them with the available materials on one of the global stratotypes of the South-China Platform.

Materials and methods

Our studies are based on the materials obtained from the Permo-Triassic basites of the eastern side of the Tunguska syncline (Fig. 2, a)

over the last 25 years [18–22 and others]. At present, it is established with a high degree of reliability for the traps:

1. Multistage trap magmatism in time [18, 23]. The scheme adopted by geologists identifies three phases: I – intrusive $\gamma\beta P_3$, II – volcanic-sub-volcanic $\beta_0\text{--}\gamma\beta P_3\text{--}T_1$ and III – intrusive $\gamma\beta T_1$, which correspond to the Olenek-Velingninsky, Katangsky and Kuzmovsky complexes of trap magmatism. The Permo-Triassic age of the considered phases of basites of the eastern side of the Tunguska syncline is accepted by geologists conditionally.

At the end of the Permian, multistage trap sills of Phase I (moderately ferruginous-titanic group, $\text{TiO}_2 \approx 1,5$ gram/tonne) were intruded; their outcrops are preserved at the watershed of the Morkoka and Allara-Delingde Rivers and on the slopes of the Morkoka River valley. Characteristic features of phase I sills are the predominance of



subhorizontal intrusions and their strike-slip stability. Precontact changes in the host rocks are weakly expressed. The structure of sills is rather simple, petrographically they are represented by fine- and medium-grained dolerites, less frequently by gabbro-dolerites.

The most widespread in the area are Phase II (magnesia-limestone group, $\text{TiO}_2 \approx 1,0$ gram/tonne) basites observed in the near-surface horizons of Middle Paleozoic sediments and in the roof of the carbonate basement (Fig. 2, *b*). The trap sills of the Phase II traps are very unstable along strike, form overhangs and blowouts, often split, and form numerous 'windows'. Cases of detachment and transport of blocks of carbonate rocks and kimberlites (Yubileinaya, Podtrappovaya pipes, etc.) by basite intrusions have been noted. Synchronously with the dolerite sills of the intrusive facies characterised above, rocks of the tuffisite and tuff facies, as well as chert-shaped bodies (rootless volcano facies) were formed. Tuffisites are found on low watersheds and basin-like depressions, and are quite widely developed. They have lithoclastic structure and consist of fragments of basalts and hypobasalts of sharp-angular shape. Their formation is associated with certain thermodynamic processes in the near-surface chambers of the forming sills (near eruptive apparatuses or with subvolcanic sills giving local explosion centres in the roof, which then inject into the host rocks) as a result of the breakthrough of gas-saturated tholeiitic melt into the watered coal-bearing strata of terrigenous Permo-Carboniferous rocks. At the same time, the surrounding terrigenous strata contain carbon-containing substances or water-carbon dioxide fluid, due to which secondary boiling increases manifold. This causes a high-power chemical chain reaction and explosive processes, as these components of coal-bearing sediments significantly enhance the physicochemical reactions of phreatomagmatic brecciation and retrograde boiling. This mechanism of tuffisitation produces peculiar cryptovolcanic structures – explosive calderas and sometimes open vents – explosion funnels with lapilli and conglobreccias. Stokes occur above intrusions of the second facies or among tuffisites (Teguryuk River). Tuffs (Alakit Formation, $\text{P}_3\text{-T}_1\text{al}$) differ from tuffisites by the presence of admixture of terrigenous material in their composition. The tuffs are dominated by coarse clastic varieties, with medium- and fine clastic varieties occurring less frequently. Thus, the Katangsky volcanic-subvolcanic complex

(the Phase II) could most likely be the source of a wide range of volcanic ashes and chemical compounds released into the atmosphere during its formation. The consequence of this effect can be anoxia (complete depletion of oxygen reserves) of the atmosphere, oceans and, as a consequence, mass extinction of organisms.

The Phase III (ferruginous-titanic group, $\text{TiO}_2 \approx 2,0$ gram/tonne) manifestation of trap magmatism in the Daldyno-Alakitsky area is associated with the Phase III manifestation of trap magmatism in the Daldyno-Alakitsky area, which is associated with shelf-sectional and stratabound basite bodies of various thickness observed mainly among the Lower Paleozoic carbonates (see Fig. 2, *b*). Near the feeder channels, intrusions often form injected uplifts, rejects of carbonate rocks and kimberlite bodies (Komsomolskaya, Krasnopresnenskaya pipes, etc.), and sometimes break through second-phase bodies. Intrusive bodies are, as a rule, secant to the host rocks, their dip angles to the surface are flattened, they are localised mostly in the east and north-east of the area. In the near-contact zones, the host rocks are metamorphosed.

Feeding channels for sills are dikes, which are distributed throughout the territory, but are mapped only in open carbonate fields (see Fig. 2, *a*). Dike intrusions are reflected on magnetic field maps by both positive linear anomalies and negative anomalies. A number of geological features indicate that the negatively magnetised dikes formed at a later stage. Dyke intrusions are rectilinear in plan or arcuately curved, and lie subvertically. Their thicknesses vary from the first metres to the first tens of metres, their length can reach 50–60 km. The most extended dikes have north-western and meridional strike. Dikes with northeastern and latitudinal orientations are less common and do not exceed 10 km in length. Many dikes are abundant with apophyses formed along the fractures dipping the feeder channel. Apophyses of the dikes in the host rocks are developed in the peripheral space (1–2 km) at different depths, as indicated by aeromagnetic survey and drilling data.

2. Each phase has a strict hypsometric (stratigraphic) confinement (see Fig. 2, *b*), from top to bottom: I – armours watersheds, II – intrudes $\text{P}_3\text{-C}_1$ terrigenous-sedimentary sediments, III – intrudes rocks of carbonate Early Paleozoic PZ_1 basement (boundary of O_{2-3}kl and S_1ln formations).

3. Diversity of forms of occurrence (dikes, sills, etc.), variability of mineralogical, chemical and petrographic compositions (differentiation, contamination, etc.) [18, 24].

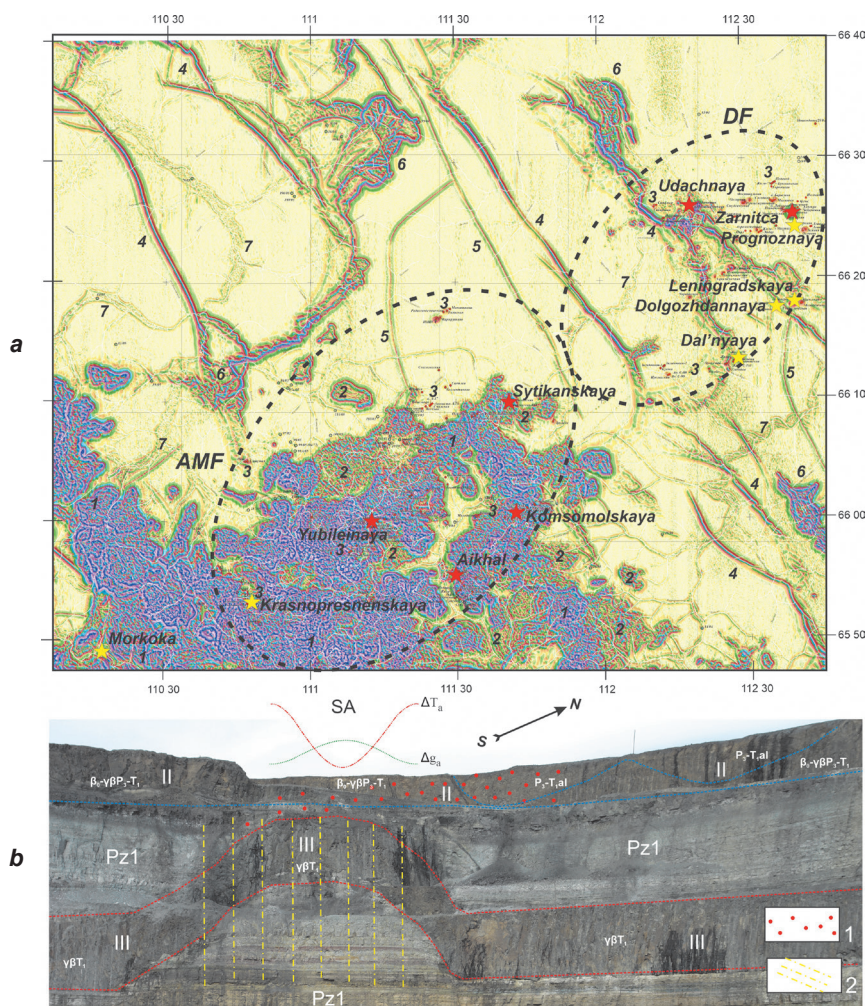


Fig. 2. Trapps of the Daldyn-Alakit diamondiferous region (eastern side of the Tunguska syncline):
a – position of the studied kimberlite bodies on the summary map of the local component of the magnetic field ΔT_{loc} (red/yellow asterisk – known diamond deposits / off-balance ores)
1–7 – mapping of igneous formations: 1, 2 – sills of trap intrusions reserving watersheds: 1 – Olenek-Velingninsky and Katangsky intrusive complexes (non-separated), 2 – Kuzmovsky intrusive complex; 3 – kimberlite pipes;
4, 5 – dolerite dikes of the Vilyui-Kotui fault zone (supply channels): 4 – positively magnetized, 5 – negatively magnetized; 6 – near-dike crosscutting and substratal dolerite intrusions; 7 – accumulation zones of trap formation destruction products in the floodplains of watercourses;
AMF – Alakit-Markha kimberlite field; DF – Daldyn kimberlite field
b – geological section of the southern northeastern side of the open pit of the Komsomolskaya pipe diamond deposit:
1 – petromagnetic heterogeneities of the firing zone; 2 – zone of increased fracturing;
II, III – basite sills of the second and third introduction phases, respectively
 Δg_a – gravity field anomaly; ΔT_a – magnetic field anomaly;
PZ1 – terrigenous-sedimentary rocks of the carbonate basement (Early Paleozoic); SA – structural type anomaly

Рис. 2. Траппы Далдыно-Алаkitского алмазоносного района (восточный борт Тунгусской синеклизы):

a – положение изученных кимберлитовых тел на сводной карте локальной составляющей магнитного поля ΔT_{loc} (красная/желтая звездочка – известные месторождения алмазов/забалансовые руды):
1–7 – картирование магматических образований: 1, 2 – sillы трапповых интрузий, бронирующих водоразделы: 1 – оленек-велингинский и катангский интрузивные комплексы (неразделенные), 2 – кузьмовский интрузивный комплекс; 3 – кимберлитовые трубки; 4, 5 – дайки долеритов Вилийско-Котуйской зоны разломов (подводящие каналы): 4 – положительно намагнитенные, 5 – отрицательно намагнитенные; 6 – околодайковые секущие и субпластовые интрузии долеритов; 7 – зоны аккумуляции продуктов разрушения трапповых образований в поймах водотоков
AMF – Алаkit-Мархинское кимберлитовое поле; DF – Далдынское кимберлитовое поле
b – геологический разрез южного северо-восточного борта карьера месторождения алмазов трубки Комсомольская:
1 – петромагнитные неоднородности зоны обжига; 2 – зона повышенной трещиноватости;
II, III – sillы базитов, соответственно, второй и третьей фаз внедрения
 Δg_a – аномалия гравитационного поля; ΔT_a – аномалия магнитного поля
PZ1 – терригенно-осадочные породы карбонатного цоколя (ранний палеозой);
SA – аномалия структурного типа



4. High-latitude palaeogeographic (see Fig. 1) and present-day positions of the Siberian Platform [25].

5. Inversions of the Earth's magnetic field at the time of the trap introduction [19, 20]: early phases I and II were magnetised by a positive magnetic field, and phase III – by a negative one.

The combination of the last two factors (items 4 and 5), according to the fundamental principle of paleomagnetology of the «central axial dipole» [26], predetermined the characteristic steep positive and negative directions of the vectors of the primary natural remanent magnetisation (NRM, I_n)³ in the traps 250 Ma ago [19, 20].

We can judge about the time of basite intrusion in the Tunguska syncline only from the general picture of $^{40}\text{Ar}/^{39}\text{Ar}$ and U-Pb isotopic dating data (Fig. 3). Against the background of 30 Ma of trap magmatism, the most reliable are two peaks within, respectively: 250 ± 5 and 243 ± 3 Ma. At present, there are only relative correlation

schemes of basitic magmatism in separate regions of the Siberian Platform, which dock with each other ambiguously.

Given the complex geological structure of the Tunguska syncline, in order to unite different tectono-magmatic events into a logical chain, it is necessary to have an age reference, in which the main role was played by precision methods⁵ of global importance. These include, first of all, isotopic and palaeomagnetic studies.

The Permian-Triassic boundary, which was approved by IUGS, can serve as the most suitable repartee for correlation of the traps of the Tunguska syncline; it was defined in Changxing County, Zhejiang Province, South China (Fig. 4) at the base of the *Hindeodus parvus* horizon, at the base of layer 27^c of the Meishan D section [17, 44–50]. ICS recognised it as a global strato-type¹ based on the following criteria:

– GSSP must define the lower boundary of the geological stage;

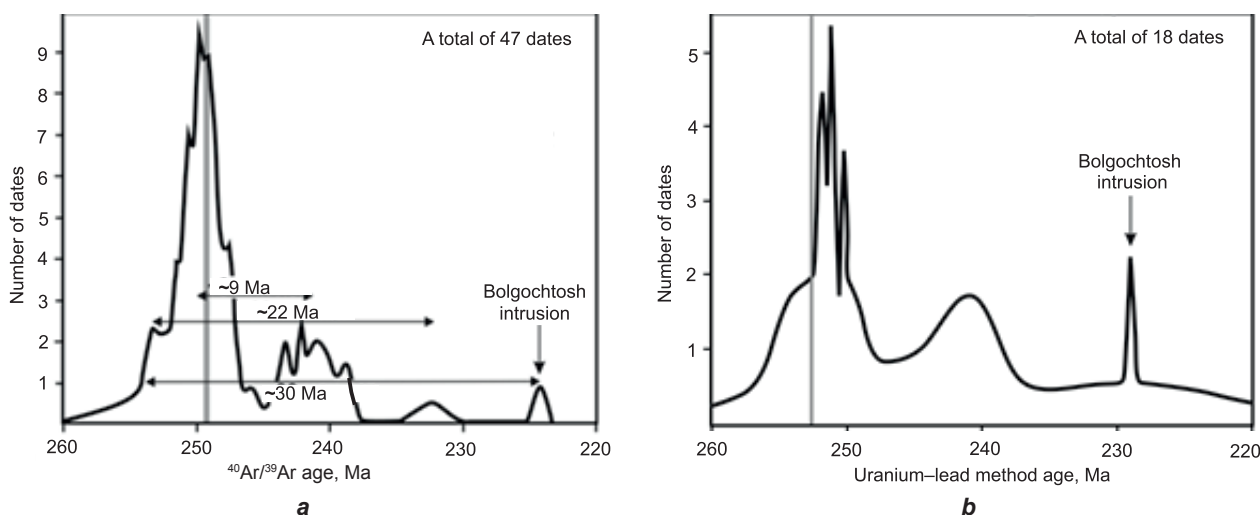


Fig. 3. Age of Siberian traps⁴:

a – distribution histogram of $^{40}\text{Ar}/^{39}\text{Ar}$ dating (the grey field shows the Permian-Triassic boundary determined by dating sanidines from ashes in the layer 28 of the section D in Meishan Province, China [27–35]); b – dating distribution histogram (uranium–lead method) (the grey field shows the Permian-Triassic boundary determined by dating zircons from ashes in the layer 28 of the section D in Meishan Province, China [14, 36–43])

Рис. 3. Возраст сибирских траппов⁴:

a – гистограмма распределения $^{40}\text{Ar}/^{39}\text{Ar}$ датировок (серым полем обозначена пермо-триасовая граница, выделенная в результате датирования санидинов из пеплов в слое 28 разреза D в провинции Мейшань в Китае [27–35]); b – гистограмма распределения датировок (уран-свинцовый метод) (серым полем обозначена пермо-триасовая граница, выделенная в результате датирования цирконов из пеплов в слое 28 разреза D в провинции Мейшань в Китае [14, 36–43])

³ The positive direction of the I_n vector is downward, the negative direction is upward.

⁴ Ivanov A.V. *Intracontinental basaltic magmatism (on the example of mesozoic and cenozoic of Siberia)*: dis. ... of doctor of geol.-min. sciences. Irkutsk; 2011, 382 p. (In Russ.) / Иванов А.В. Внутриконтинентальный базальтовый магматизм (на примере мезозоя и кайнозоя Сибири): дис. ... д-ра геол.-минерал. наук. Иркутск, 2011. 382 с.

⁵ Precision method – is a method that allows measurements to be carried out with very high accuracy, i. e. with record low error. It determines the degree of proximity of independent measurement results obtained under specific regulated conditions to each other to an accepted reference value (the reper).

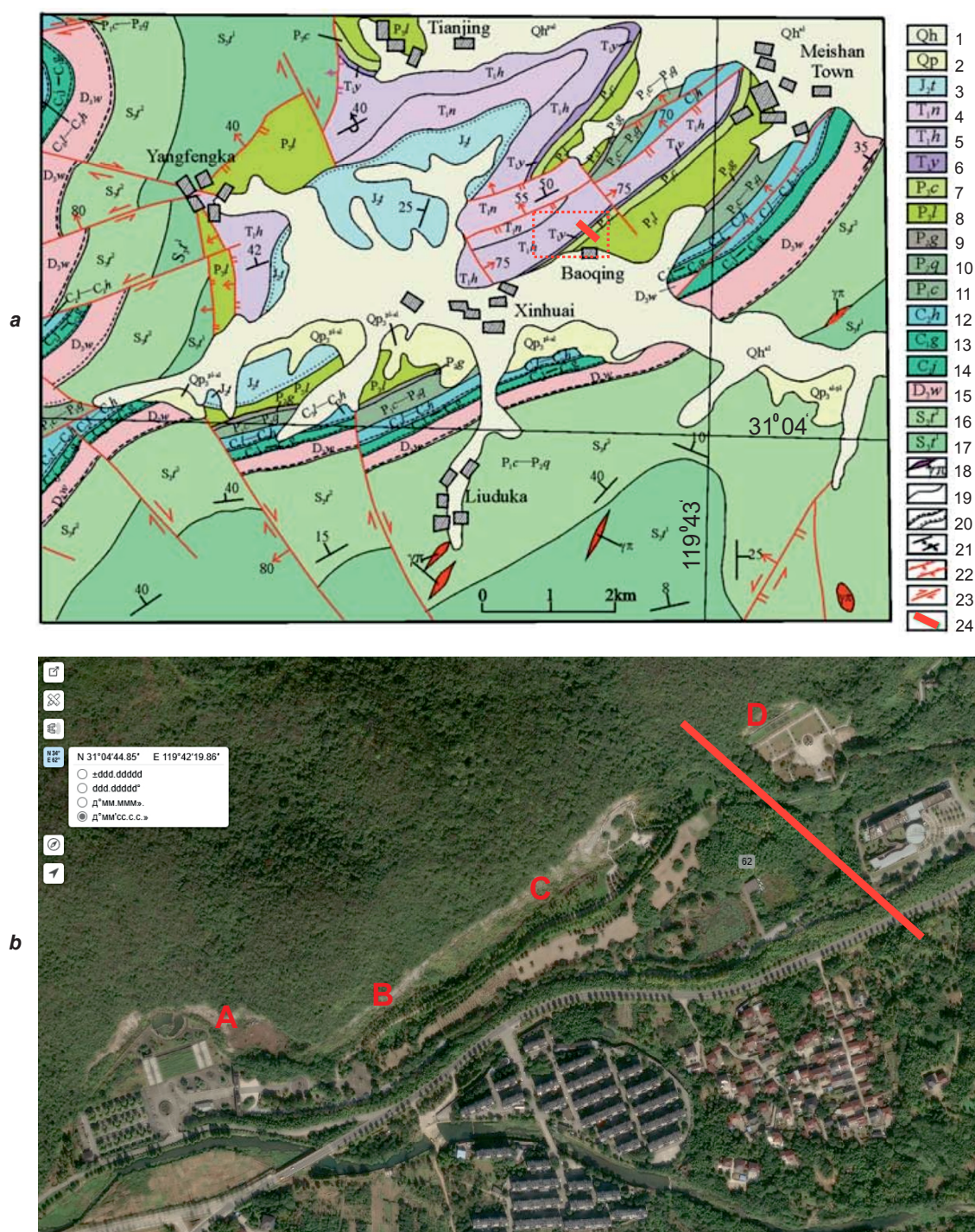


Fig. 4. Geological map [44] and location of the global stratotype park of the Meishan area:

a – geological map: 1 – Holocene; 2 – Pleistocene; 3 – 17 – formations: 3 – Tongshang; 4 – Nanlinghu; 5 – Helongshan; 6 – Yinkeng; 7 – Changxing; 8 – Longtan; 9 – Gufeng; 10 – Qixia; 11 – Chuanshan; 12 – Huanglong; 13 – Gaolishan; 14 – Jinling; 15 – Wutong; 16 – Tangjiawu (Upper mixed bed); 17 – Tangjiawu (Lower mixed bed); 18 – granite-porphry dike; 19 – conformity boundary; 20 – parallel/angular unconformity boundary; 21 – normal/reverse stratigraphic bedding; 22 – normal/reverse fault; 23 – strike-slip fault; 24 – Meishan, section D

b – park position: A–D – Meishan Geopark quarries (Global Stratotype Section and Point)

Рис. 4. Геологическая карта [44] и положение парка глобального стратотипа района Мейшань:

а – геологическая карта: 1 – голоцен; 2 – плейстоцен; 3 – 17 – свиты: 3 – Туншан; 4 – Наньлинху; 5 – Хелонгшань; 6 – Инькэн; 7 – Чансин; 8 – Лунтан; 9 – Гуфэн; 10 – Цися; 11 – Чуаньшань; 12 – Хуанлун; 13 – Гаолишань; 14 – Цзиньлин; 15 – Вутун; 16 – Танцзяву (верхний смешанный слой); 17 – Танцзяву (нижний смешанный слой); 18 – гранит-порфировая дайка; 19 – граница соответствия; 20 – параллельная/угловая граница несогласия; 21 – нормальное/обратное стратиграфическое залегание; 22 – нормальный/обратный разлом; 23 – сдвиговый разлом; 24 – Мейшань, разрез D

б – положение парка: А–D – карьеры геопарка Мейшань (Глобальный стратотипический разрез и точка)



– the lower boundary must be defined by a primary marker (usually data on the first occurrence of a fossil species);

– there should also be secondary markers (other fossils, chemical, geomagnetic inversions);

– the horizon in which the marker appears must contain minerals that can be radiometrically dated;

– the marker must have regional and global correlation in outcrops of the same age;

– the marker should be facies independent (without any changes in facies);

– sedimentation must be continuous;

– the outcrop must have sufficient thickness;

– the outcrop should be unaffected by tectonic and sedimentary movements and metamorphism;

– the outcrop must be accessible and readily available for research: it must be quickly accessible (international airport and good roads), well maintained (ideally in a national reserve), in an accessible area, extensive enough to allow repeat sampling, and open to researchers of all nationalities.

The participants of the international expedition visited this stratotypic outcrop (see Fig. 5) and collected important information on it, necessary for global correlation with the Siberian traps. At present, the global Permian-Triassic boundary stratotype is characterised by a wide range of scientific information [17, 44–50].

The Permian-Triassic boundary runs along layer 27, composed of argillic micrites (see Fig. 5, *b*) [45–50]. The main fossils of the Early Triassic sole (layers 27^c and 27^d) are the extinct conodont genus *Hindeodus parvus*, *Ellisonia* and *Isarcicella isarcica* (see Fig. 5, *c*, *d*). Most likely, the demise of Permian conodonts is due to global anoxia, as indicated by the $\delta^{13}\text{C}$ peak of the Protein Data Bank (PDB)⁶ plot [51]. This zone has been recorded in 27 localities of 11 provinces of South China, as well as in Selong (Tibet, China), Guryul Gorge (Kashmir), Spiti (India), Abad and Kuh-e-Ali Bashi (Iran), Narmal Nala (Pakistan), Gartner Kofel (Austria), Tesero (Italy), Western America, Arctic regions of Canada, Australia, Timor and other localities [44].

Based on radioisotope studies (Table 1), the age boundary of the Permian and Triassic is estimated to be 252.17 ± 0.06 Ma. The results of re-

cent radioisotopic ages of both U/Pb and $^{40}\text{Ar}/^{39}\text{Ar}$, according to the dating of volcanic ash, the age of Permian-Triassic boundary in marine strata and the age of mass extinction are indistinguishably 252.5 ± 0.2 Ma [35, 53].

Studies [58–62] have shown that the Meishan C and D sections can be divided into five subzones of normal polarity and four subzones of reversed polarity (Fig. 6). The lower part of the Changxi Stage has normal polarity, and the upper part has both normal and reverse polarity. In general, the Permian-Triassic boundary is characterised, with a high degree of probability, by the direct polarity of the Earth's magnetic field (MS5n).

To solve the problem of regional paleomagnetic correlation of the traps of the Tunguska syncline of the Siberian Platform with the global stratotypic section of the Permian-Triassic terrigenous-sedimentary formations in the Zhejiang Province of South China (see Fig. 4), we selected basites of three phases of intrusion of the Alakit-Markha kimberlite field (see Fig. 2, *a*). One of the important objects for studying the sequence of basite formation is the Komsomolskaya pipe diamond field, in the quarry of which two sills of dolerites of II and III phases of intrusion are exposed [10, 18] (see Fig. 2, *b*). The dolerite sill of the II phase lies horizontally on the watershed, while the dolerite sill of the III phase is emplaced in the Early Paleozoic carbonate basement. The Phase III sill, rising in the area of increased fracturing to the footwall of the Phase II sill, forms a sigmoid and thereby cuts the northwestern block of the diatreme to form a kimberlite detachment.

Studies of basites of the Tunguska syncline included:

1. Field work on selection of oriented pieces [26]. In total, more than 600 pieces were sampled;

2. Sample preparation – making 3–4 cubes with 20 mm rib from the samples. In total about 2000 cubes were obtained;

3. Laboratory research of physical properties (density, magnetisation), petro- and paleomagnetic analyses. The investigations were carried out with modern equipment: magnetic susceptibility $\propto$ meters (KLY-3s and MFK1-FA, AGICO,

⁶ Protein Data Bank (PDB) – is a data bank of three-dimensional structures of proteins and nucleic acids. Information obtained by X-ray crystallography or nuclear magnetic resonance (NMR) spectroscopy, and increasingly by cryo-electron microscopy, is entered into the database by biologists and biochemists from all over the world and is available free of charge through the websites of its member organisations (PDBe, PDBj, RCSB). The PDB is one of the most important resources for scientists working in structural biology. Most scientific journals and some research funding foundations, e. g. NIH in the USA, require authors of articles and grantees to have all structural data posted on the PDB. The PDB contains mainly primary data on the structure of biological molecules, while there are hundreds of other data banks categorising primary data or identifying patterns between molecular structure and evolutionary relatedness.

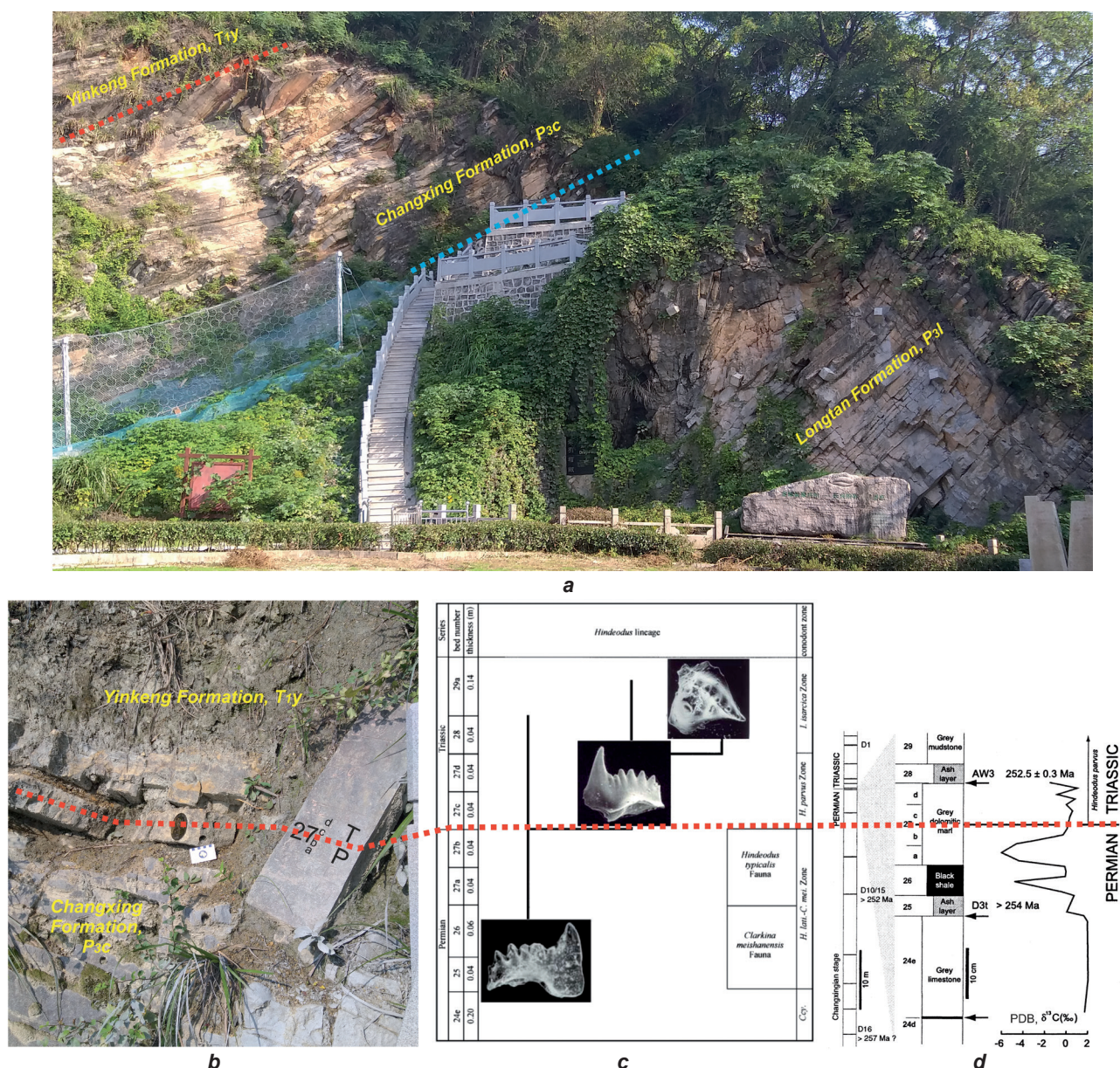


Fig. 5. Meishan D geological section, Changxi County, Zhejiang Province, South China, China [44]:

a – view of Meishan section D with indicated lithostratigraphic units; b – “Golden Nail” (a bronze disc in the middle of the image) or ‘type section’ of the global boundary stratotype section and the point for the formation of the Permian-Triassic boundary; c – Hindeodus evolutionary lineage at the Permian-Triassic boundary:

Ccy – *Clarkina changxingensis yini* Zone, *H. lati.* – *C. mei.* – *Hindeodus latidentatus* – *Clarkina meishanensis*;

d – detailed stratigraphy for the Permian-Triassic boundary interval at Meishan (South China) with indicated ash layers and assigned ages, three extinction levels (horizontal arrows) and $\delta^{13}\text{C}$ curve Protein Data Bank [51].

The column to the left shows the stratigraphic sequence exposed at the proposed Permian-Triassic boundary stratotype, section D and section AW, with volcanic ash layers (black bands) and samples collected for isotopic age dating (D16, D10/15, D3t, AW3 and D1) [52]

Рис. 5. Геологический разрез Мейшань D, округ Чансин, провинция Чжэцзян, Южный Китай (Китай) [44]:

a – вид Мейшаньского разреза D с указанием литостратиграфических подразделений;

b – «золотой гвоздь» (бронзовый диск в средней части изображения), или типовой разрез глобального пограничного стратотипического разреза и точки для основания пермо-триасового рубежа;

c – эволюционная линия *Hindeodus* на пермо-триасовой границе:

Ссу – зона *Clarkina changxingensis yini*, *H. lati.* – *C. mei.* – *Hindeodus latidentatus* – *Clarkina meishanensis*;

d – подробная стратиграфия для пермо-триасового пограничного интервала в Мэйшане (Южный Китай) с указанием слоев пепла и присвоенного возраста, трех уровней вымирания (горизонтальные стрелки) и $\delta^{13}\text{C}$ кривая Банка данных о белках [51]. В столбце слева показана стратиграфическая последовательность, обнаженная на предполагаемом пермо-триасовом стратотипе, разрезе D и разрезе AW, со слоями вулканического пепла (черные полосы) и образцами, собранными для датирования изотопного возраста (D16, D10/15, D3t, AW3 и D1) [52]



Table 1. Radiometric dating of the Permian-Triassic boundary at Meishan section
Таблица 1. Радиометрическое датирование границы перми и триаса разреза Мейшань

Bed	References				
	[54]	[55]	[56]	[57]	[52]
36	–	–	250.2±0.2 (U)	252.6±1.2 (S)	–
34	–	–	–	253.6±1.3 (S) 249.2–253.5 (U)	–
33	–	–	250.4±0.5 (U)	–	–
28	–	–	250.7±0.3 (U) –	251.7±1.4 (S) 251.6±0.3 (U)	–
25	251.2±3.4 (S)	249.91±0.15 (Ar)	251.4±0.3 (U)	–	253 (U)
20	–	–	252.3±0.3 (U)	–	–
7	–	–	253.4±0.2 (U)	–	–

Note. S – SHRIMP U/Pb; U – ordinary U/Pb (zircon); Ar – $^{40}\text{Ar}/^{39}\text{Ar}$.

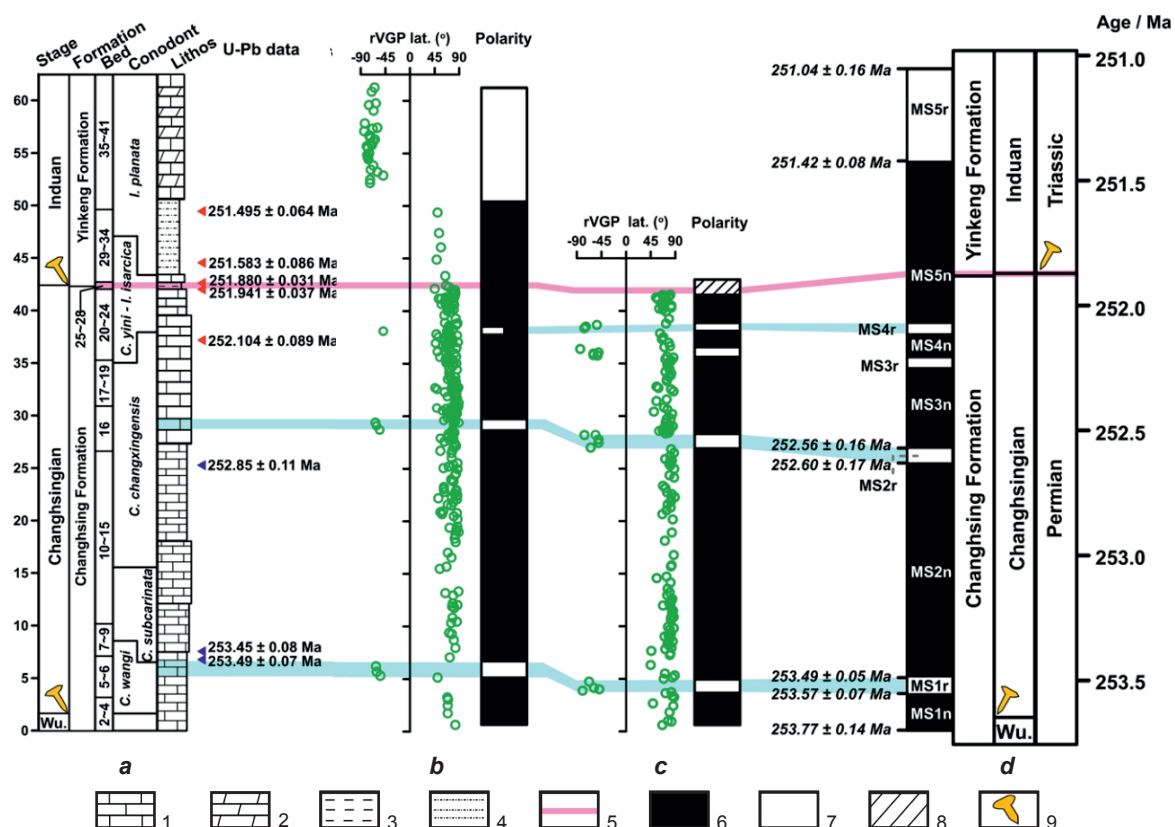


Fig. 6. Magnetostratigraphic results for the Meishan sections (southeastern China) [62]:
a – Meishan section lithology; b – Meishan section C; c – Meishan section D; d – composite magnetostratigraphic results for the Meishan sections
Conodont zones are modified from the source [63]. Data (blue and red triangles) are taken from the sources [64, 65], respectively (uranium-lead method)
rVGP – rotated virtual geomagnetic pole; Wu. – Wuchiapingian; C. – Clarkina; I. – Isarcicella
1 – limenstone; 2 – argillaceous limenstone; 3 – clayey rocks; 4 – mudstone; 5 – maximum interval of the end-Permian mass extinction; 6 – reverse polarity; 7 – normal polarity; 8 – no data; 9 – “Golden Nail” (Global Stratotype Section and Point)

Рис. 6. Магнитостратиграфические результаты по разрезам Мейшань (Юго-Восточный Китай) [62]:

a – литология разреза Мейшань; b – Мейшаньский разрез C; c – Мейшаньский разрез D; d – составленные магнитозоны

Зоны конодонтов модифицированы согласно источнику [63]. Данные (синие и красные треугольники) взяты из работ [64, 65] соответственно (уран-свинцовый метод)
rVGP – повернутый виртуальный геомагнитный полюс; Wu. – Wuchiapingian; C. – Clarkina; I. – Isarcicella
1 – известняк; 2 – аргиллитовый известняк; 3 – глинистые породы; 4 – аргиллит; 5 – максимальный интервал конца пермского массового вымирания; 6 – обратная полярность; 7 – нормальная полярность; 8 – нет данных; 9 – «золотой гвоздь» (Глобальный стратотипический разрез и точка)



Czech Republic), spin-magnetometers for measuring NRM vectors (JR-6, AGICO, Czech Republic), demagnetising units with alternating magnetic field (AF-Demagnetizer, Molspin LTD, UK) and temperature (MMTD80, Magnetic Measurements LTD, UK), vibro-magnetometers and magnetic fraction meters (Kazan, KFU, RF), etc.

4. Complex interpretation of geological and geophysical materials.

Results and discussion

The main results of petrophysical, palaeomagnetic and analytical studies of Permo-Triassic basites studied within the eastern side of the Tunguska syncline (see Fig. 2, a) can be summarised as follows:

1. The spectrum of density and magnetic parameters in "natural occurrence" was obtained (Table 2). The values of magnetic parameters of basites have a wide enough range of dispersion. Tuffs and microdolerites have minimum values of magnetisation: $\alpha \approx 40...50 \times 10^{-5}$ SI, $I_n \approx 1...10 \times 10^{-3}$ A/m, factor $Q \approx 0.05...0.50$ units. The magnetic susceptibility of dolerites of the III phase is relatively higher than that of the I and II phases of embedding, which is determined by the increased iron content [10, 18]. At the same time, the values of NRM vectors and Q factor of phase III basites are relatively lower than those of the early phases of basites. This effect is related to the demagnetising effect of the geomagnetic field on the primary magnetisation of phase III basites.

The I_n vectors, which have both positive and negative directions (see Table 2), regardless of the time of phase introduction (the same phase of basites can be magnetised both positively and negatively), deserve special attention. In terms of the time of formation, the I_n vectors can be both primary (synchronous to the formation of rocks) I_n^0 and metachronic (secondary, superimposed) I_n^m . The latter, as a rule, can form different types of petromagnetic inhomogeneities [20]: remagnetisation by the geomagnetic field (type 1), "firing" (type 2); "self-turning" (type 3), thunderstorm strikes (type 4), and "stress" (type 5).

In this connection, it is necessary to establish the palaeomagnetic nature of those and other NRM vectors on the basis of the study of their component composition.

2. Massive palaeomagnetic studies with alternating magnetic field and temperature have shown that the first two phases at the time of their formation were magnetised by the Earth's magnetic field of positive polarity (close to the present-day direction),

while phase III was negatively magnetised [20, 21].

This conclusion was confidently proved at the diamond deposit of the Komsomolskaya kimberlite pipe (see Fig. 2, b). According to the data of the component paleomagnetic analysis, the sill of phase III basites (Kuzmovsky intrusive complex), rising along the zones of increased fracturing, remagnetises the sill of phase II dolerites (Katangsky volcanic complex) in the endocontact. For example, obr. Kom03-143t5 from the sill of phase III dolerites, after removal of the low-temperature (less than 250 °C) component A , has the primary component B of the I_n^0 vector of reversed polarity (Fig. 7, c). At the same time, in the overlying dolerites and tuffs of Kom01-24t14 of the II phase, the same component B is isolated in the medium-temperature region (from 250 to 450 °C) and is meta-chronous I_n^m , while the high-temperature (more than 450 °C) component D is primary of direct polarity (Fig. 7, b). At a distance from the contact with Phase III, only one primary D component is established in the dolerites of the Katangsky complex of the Kom04-236t2 cluster (Fig. 7, a). Thus, the paleomagnetic materials (Table 3) clearly indicate a relatively young age of the phase III basites.

Simultaneously, a structural type anomaly is formed above the sigmoidal shape of the sill of phase III associated with its ascent to the footwall of the sill of phase II and remagnetisation of the primary I_n^0 vectors of the latter in the endocontact from direct to reverse polarity with the formation of I_n^m (see Fig. 2, b) [20, 66]. As a result of firing of dolerites of III phase by sillom, petromagnetic heterogeneity of the second type is formed in the endocontact of basites of II phase. In the process of «temperature» influence, the petromagnetic boundary shifts up the section by 25–30 m relative to the geological (petrodensity boundary). Thus, structural type anomalies are formed on the flanks of such diamond deposits, which are characterised by positive gravity Δg_a (amplitude up to 1.5 mGal) and negative magnetic ΔT_a (amplitude up to -1000 nT) effects. Similar anomalies may reflect diatreme association structures and, therefore, indicate areas promising for the search for kimberlite bodies.

3. $^{40}\text{Ar}/^{39}\text{Ar}$ geochronological studies of dolerites by the step heating method [67] performed at the V.S. Sobolev Institute of Geology and Mineralogy Siberian Branch of the Russian Academy of Sciences (Novosibirsk) showed that the introduction of sill dolerites of phase II (Katangsky volcanic complex) of the kimberlite pipe diamond deposit of the Komsomolskaya kimberlite pipe corresponds to the Permo-Triassic period and is 255.5 ± 4.3 Ma [66].



Table 2. Magnetic parameter spectrum of Permian-Triassic traps of the eastern side of the Tunguska syncline
Таблица 2. Спектр магнитных параметров пермо-триасовых траппов восточного борта Тунгусской синеклизы

Site, rock type	<i>n</i>	α (ε), 10 ⁻⁵ SI	<i>In</i>				<i>Q</i> (ε), units
			<i>In</i> (ε), 10 ⁻³ A/m	<i>Dm</i> , °	<i>Jm</i> , °	<i>k</i> , units / α ₉₅ , °	
First phase (Olenek-Velingsninsky complex), γβP ₃							
Morcoca, dolerites	25	1890 (1.03)	5495 (1.07)	150	85	49.1/4.0	6.09 (1.08)
Morcoca, dolerites*	3	1445 (1.06)	4848 (1.06)	100	-80	2036.6/2,7	7.10 (1.01)
Trace, dolerites	130	1765 (1.03)	4100 (1.06)	345	80	10.9/4.0	4.86 (1.06)
Second phase (Katangsky complex), β ₀ -γβP ₃ -T ₁							
Aikhal, dolerites	140	1130 (1.03)	2800 (1.05)	80	82	29.4/2.2	5.1 (1.03)
Bistriy, dolerites	95	1490 (1.02)	4550 (1.09)	35	75	4.4/7.9	6.39 (1.09)
Yubileinaya, dolerites	110	1800 (1.02)	4050 (1.03)	35	83	48.9/1.9	4.7 (1.04)
Komsomolskaya, dolerites	130	1300 (1.04)	1700 (1.04)	74	82	38.0/2.1	2.9 (1.05)
Komsomolskaya, dolerites*	60	1155 (1.05)	570 (1.08)	275	-60	13.7/5.2	1.03 (1.07)
Komsomolskaya, tuffs	50	40 (1.04)	10 (1.15)	85	85	15.8/5.3	0.43 (1.14)
Komsomolskaya, tuffs*	55	40 (1.03)	5 (1.14)	290	-60	16.3/5.0	0.42 (1.12)
Alakit, dolerites	45	1600 (1.02)	10445 (1.18)	60	70	3.30/14.3	13.66 (1.17)
Chukuka, dolerites	40	1420 (1.05)	3590 (1.05)	45	85	41.0/3.5	5.30 (1.06)
Cherniy, dolerites	105	1600 (1.02)	5130 (1.06)	55	70	6.3/6.0	6.72 (1.06)
Trace, microdolerites	40	65 (1.01)	5 (1.28)	355	60	6.1/10.1	0.14 (1.27)
Microdoleritoviy dolerites	80	850 (1.05)	1715 (1.07)	50	80	13.5/4.5	4.24 (1.06)
Microdoleritoviy microdolerites	40	65 (1.01)	5 (1.20)	90	85	49.5/3.2	0.15 (1.20)
Sytikanskaya, dolerites*	45	1200 (1.09)	470 (1.11)	320	45	3.7/12.8	0.82 (1.06)
Vodorazdelniy, dolerites	40	1005 (1.12)	3210 (1.15)	65	85	40,9/3,5	6.68 (1.07)
Vodorazdelniy, microdolerites	140	65 (1.01)	1 (1.14)	40	75	4.58/6.5	0.04 (1.12)
Vodorazdelniy, tuffs	55	50 (1.02)	5 (1.09)	95	85	26.0/3.8	0.16 (1.08)
Third phase (Kuzmovsky complex), γβT ₁							
Komsomolskaya, dolerites	180	1500 (1.02)	870 (1.05)	285	-60	11.5/3.3	1.1 (1.05)
Sytikanskaya, dolerites	195	1260 (1.03)	1015 (1.04)	290	-45	6.8/4.2	1.66 (1.07)
Alakit, dolerites	75	1370 (1.09)	1405 (1.11)	300	-60	3.0/11.5	2.15 (1.11)
Bistriy, dolerites	30	2065 (1.02)	1020 (1.07)	330	-10	2.1/24.5	1.03 (1.09)
Chukuka, dolerites	105	1740 (1.02)	1900 (1.13)	345	-40	1.9/14.5	2.28 (1.13)
Sohsolooch, dolerites	50	2070 (1.02)	1020 (1.07)	330	-10	2.1/24.5	1.03 (1.09)
—	1948	—	—	—	—	—	—

Note. *n* – number of samples participating in the statistics; *In* – absolute values of vectors *In*; *Dm* – mean declination; *Jm* – mean inclination; *k* – heaping; α_{95} – confidence angle with 95 % probability of *In* vectors; the standard multiplier is in parentheses; * – petromagnetic inhomogeneity of type 2 (heating on the sill side of dolerites of third phase).

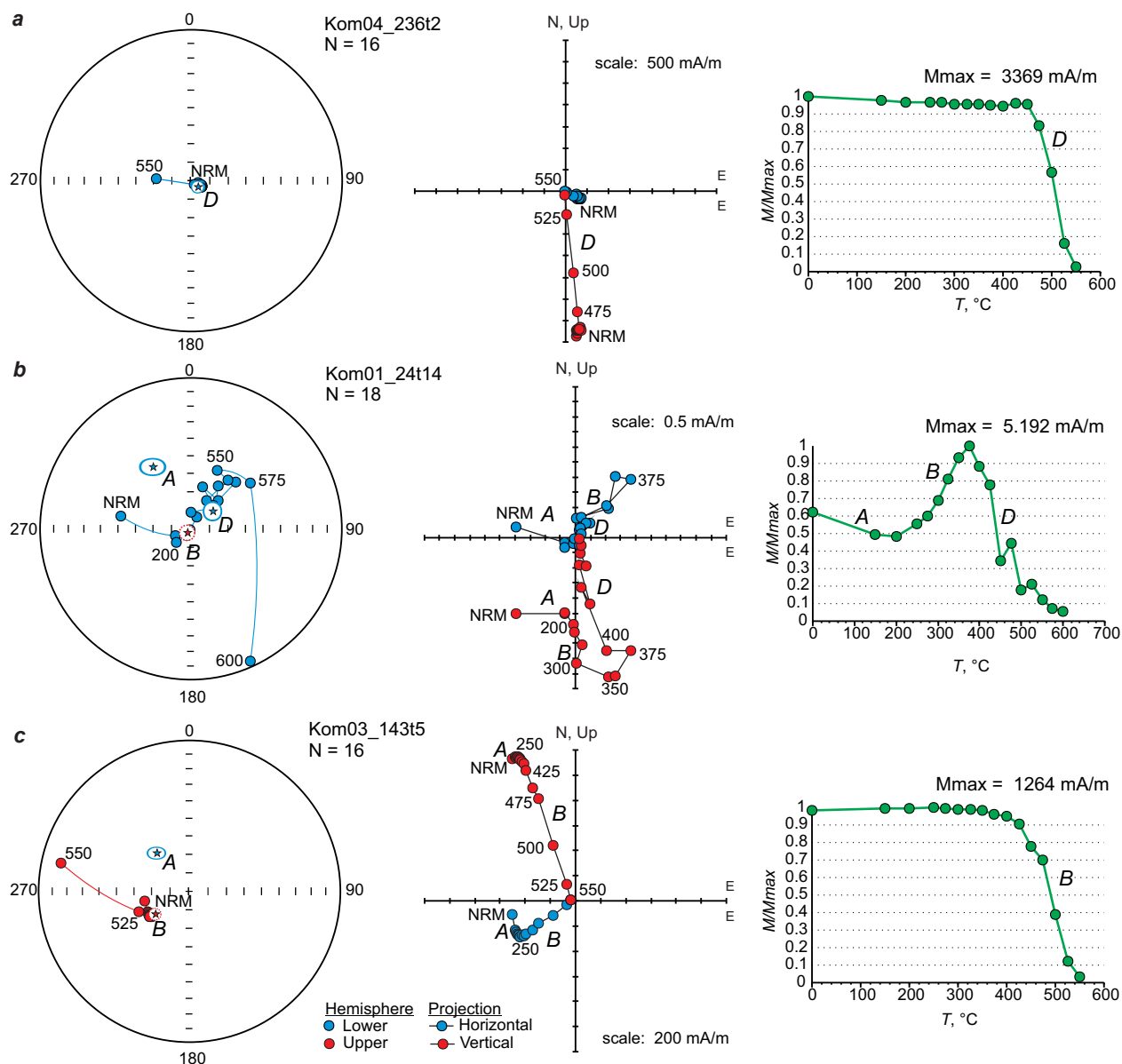


Fig. 7. Paleomagnetic studies of basites of the Katangsky (a, b) and Kuzmovsky (c) volcanic complexes of the Komsomolskaya kimberlite pipe diamond deposit:

a – Katangsky volcanic complex dolerites (phase II); c – Kuzmovsky volcanic complex dolerites (phase III);
b – Alakit suite tuffs (see the article for other designations)

Рис. 7. Палеомагнитные исследования базитов катангского (a, b) и кузьмовского (c) вулканических комплексов месторождения алмазов кимберлитовой трубки «Комсомольская»:
a – долериты катангского (II фаза) вулканического комплекса; c – долериты кузьмовского (III фаза) вулканического комплекса; b – туфы алаkitской свиты (другие обозначения см. в тексте)

Table 3. Paleomagnetic directions of different-phase basites of the Komsomolskaya kimberlite pipe diamond deposit

Таблица 3. Палеомагнитные направления разнофазных базитов месторождения алмазов кимберлитовой трубки «Комсомольская»

Objects	<i>n</i>	<i>Dm</i> , °	<i>Jm</i> , °	<i>k</i>	α_{95} , °
Dolerites, phase III, <i>In</i> ^o (component B)	32	259	-75	12.5	7.5
Dolerites, II phase, <i>In</i> ^m (component B)	41	254	-66	9.3	7.7
Tuffs of the Alakit Formation, Phase II, <i>In</i> ^m (component B)	11	245	-68	15.9	11.8
Tuffs of the Alakit Formation, Phase II, <i>In</i> ^o (component D)	17	42	80	10.0	11.9
Dolerites, II phase, <i>In</i> ^o (component D)	57	65	82	25.4	3.8

Note. *n* – number of samples; parameters of NRM vectors grouping; *Dm* – mean declination; *Jm* – mean inclination; *k* – heaping; α_{95} – confidence angle with 95 % probability of *In* vectors.

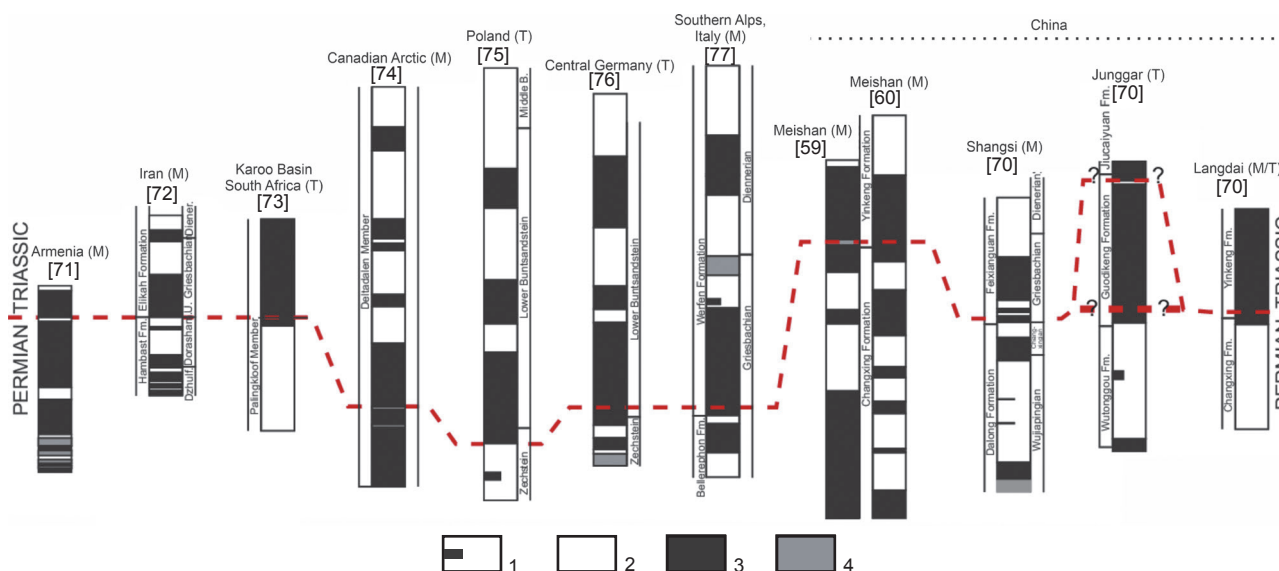


Fig. 8. Correlation of the composite section magnetostratigraphies of the Shangsi, Junggar, and Langdai localities with other Permian-Triassic marine records from around the world [69]:

1 – possible short polarity chron, 2 – reverse polarity, 3 – normal polarity, 4 – no data

T – terrestrial sections; M – marine sections; M/T – paralic⁷ sections

Рис. 8. Корреляция магнитостратиграфии составных разрезов из местонахождений Шанси, Чжунгар и Лангдай с другими морскими данными перми – триаса со всего мира [69]:

1 – возможное короткое замыкание хрона; 2 – обратная полярность; 3 – нормальная полярность; 4 – нет данных

T – наземные разрезы; M – морские разрезы; M/T – паралические⁷ разрезы

Thus, according to isotopic and palaeomagnetic studies of basites from the eastern side of the Tunguska syncline, we have for the Katangsky complex (phase II) an age from 259.8 to 251.2 Ma and the direct polarity of the primary magnetisation of I_n^0 vectors. The data obtained for the Siberian Platform agree well with the geochronological (252.17 ± 0.06 Ma) and palaeomagnetic (direct polarity) data on Permian-Triassic boundary of the Meishan section of the South China Platform (see Table 1, Fig. 6).

Since the basites of the Kuzmovsky intrusive complex remagnetise the basites of the Katangsky complex, they are relatively younger and, according to [68], may belong to the second stage of magmatic activity of the traps of the Siberian Platform – approximately 244 ± 5 Ma (see Fig. 3).

Fig. 8 shows the magnetostratigraphic correlation of geological sections of the world [69]. The Permian-Triassic boundary is characterised with a high degree of probability by the direct polarity of the Earth's magnetic field [58, 59, 69–78].

Conclusion

In the course of the Sino-Russian geological expedition in Nanjing and the Yangtze River delta, the following results were obtained on the basis of comparison of modern isotopic, paleontological, bio-, chemo- and magnetostratigraphic, etc. data

on the Permian-Triassic boundary of the Meishan section of Zhejiang Province, South China Platform (see Fig. 4, 5) with the basites of the eastern side of the Tunguska syncline of the Siberian Platform (see Fig. 2):

1. The spectrum of values of petrophysical parameters (see Table 2) and palaeomagnetic directions of NRM vectors of basites (see Fig. 7, Table 3).

2. The Katangsky complex may have been a major source of volcanic ash and gases that were transported in the Earth's atmosphere over great distances. Their traces were recorded in the Permian-Triassic Meishan stratotypic section on the South China Platform (see Fig. 5). The abrupt climatic changes associated with its introduction caused the extinction of old organisms and the appearance of new ones (e. g., the conodonts under consideration).

3. The age of basites of the Katangsky volcanic complex (phase II), which corresponds to the Permian-Triassic boundary – approximately 252 ± 2 Ma, was determined. Thus, the basites of this complex can be considered as a Permian-Triassic boundary reper, with which other volcanic complexes of the Tunguska syncline of the Siberian Platform can be correlated.

4. The age of formation of basites of the Kuzmovsky volcanic complex (phase III) corresponds

⁷ A paralic horizon is a weathered layer of bedrock. The term comes from the Greek words para, meaning “similar”, and lithic, meaning “rocky”.



to the second stage of magmatic activity of the traps of the Siberian Platform – about 244 ± 5 Ma (see Fig. 3).

5. The structural type anomalies, the nature of which is related to the nature of basites behaviour on the flanks of kimberlite diatremes, were substantiated, which is reasonable to use for their search by geophysical methods [79].

The results obtained about the sequence of formation of Permo-Triassic basites of the Tunguska syncline will be in demand for solving a wide range of scientific and applied geological issues, such as geodynamic reconstructions of lithospheric plates, clarification of the time of mass extinction of some groups of organisms, petromagnetic correlation and mapping of Siberian traps, mineralogy and prospecting for mineral deposits.

References

1. Lur'e M.L., Polunina L.N., Tuganova E.V. Principles of intrusion dissection in the Late Paleozoic – Early Mesozoic "trap" formation of the Siberian Platform. In: Afanasiev G.D. (ed.). *Petrology and metallogeny of basites*. Moscow: Nauka; 1973, p. 116-126. (In Russ.).
2. Zolotukhin V.V., Vilenskii A.M., Dyuzhikov O.A. *Basalts of the Siberian platform*. Novosibirsk: Nauka; 1986, 245 p. (In Russ.).
3. Parfenov L.M., Kuz'min M.I. *Tectonics, geodynamics and metallogeny of the Sakha Republic (Yakutia)*. Moscow: MAIK "Nauka/Interperiodica"; 2001, 517 p. (In Russ.).
4. Polyakov G.V. *Traps of Siberia and the Deccan: similarities and differences*. Novosibirsk: Nauka; 1991, 216 p. (In Russ.).
5. Al'mukhamedov A.I., Medvedev A.Ya., Zolotukhin V.V. Chemical evolution of the permian-triassic basalts of the Siberian Platform in space and time. *Petrologia*. 2004;12(4):339-353. (In Russ.). EDN: OXNOKZ.
6. Masaitis V.L. Permian and Triassic volcanism of Siberia: dynamic reconstruction issues. *Proceedings of the Russian Mineralogical Society*. 1983;112(4):412-425. (In Russ.).
7. Dobretsov N.L., Borisenko A.S., Izokh A.E., Zhmodik S.M. A thermochemical model of Eurasian permo-triassic mantle plumes as a basis for prediction and exploration for Cu-Ni-PGE and rare-metal ore deposits. *Geologiya i geofizika*. 2010;9:1159-1187. (In Russ.). EDN: MVSOEF.
8. Fedorenko V.I., Lightfoot P.C., Naldrett A.J., Czamanske G.K., Hawkesworth C.J., Wooden J.L., et al. Petrogenesis of the floodbasalt sequence at Noril'sk, North Central Siberia. *International Geology Review*. 1996;38(2):99-135.
9. Oleinikov B.V. Geochemical typification of platform basites. In: Koval'skii V.V., Lazebnik K.A., Nikishov K.N. (eds). *Geochemistry and mineralogy of Siberian Platform basites and ultrabasites*. Yakutsk: Yakut Branch of the Siberian Branch of the USSR Academy of Sciences; 1984, p. 4-21. (In Russ.).
10. Tomshin M.D., Kopylova A.G., Tyan O.A. Petrochemical diversity of traps on the eastern periphery of the Tunguska syncline. *Geologiya i geofizika*. 2005;46(1):72-82. (In Russ.). EDN: MUMSTD.
11. Campbell I.H., Czamanske G.K., Fedorenko V.A., Hill R.I., Stepanov V. Synchronism of the Siberian traps and the Permian-Triassic boundary. *Science*. 1992;258(5089):1760-1763. <https://doi.org/10.1126/science.258.5089.1760>.
12. Wilson J.T. A possible origin of the Hawaiian Islands. *Canadian Journal of Physics*. 1963;41(6):863-870. <https://doi.org/10.1139/p63-094>.
13. Kuzmin M.I., Yarmolyuk V.V., Kravchinsky V.A. Phanerozoic hot spot traces and paleogeographic reconstructions of the Siberian continent based on interaction with the African large low shear velocity province. *Earth-Science Reviews*. 2010;102(1):29-59. <https://doi.org/10.1016/j.earscirev.2010.06.004>.
14. Paton M.T., Ivanov A.V., Fiorentini M.L., McNaughton N.J., Mudrovskaya I., Reznitskii L.Z., et al. Late Permian and Early Triassic magmatic pulses in the Angara-Taseevskaya syncline, South Siberian traps and their possible impact on the environment. *Geologiya i geofizika*. 2010;51(9):1298-1309. (In Russ.). EDN: MVSOGX.
15. Scotese C.R., Langford R.P. Pangea and the paleogeography of the Permian. In: Scholle P.A., Peryt T.M., Ulmer-Scholle D.S. (eds). *The Permian of northern Pangea*. Berlin: Springer-Verlag; 1995, p. 3-19. https://doi.org/10.1007/978-3-642-78593-1_1.
16. Torsvik T.H., Cocks L.R. Triassic. In: Torsvik T.H., Cocks L.R. *Earth history and palaeogeography*. Cambridge: Cambridge University Press; 2016, p. 138-158. <https://doi.org/10.1017/9781316225523.012>.
17. Remane J., Bassett M.G., Cowie J.W., Gohrbandt K.H., Lane H.R., Michelsen O., et al. Revised guidelines for the establishment of global chronostratigraphic standards by the International Commission on Stratigraphy (ICS). *Episodes*. 1996;19(3):77-81. <https://doi.org/10.18814/epiugs/1996/v19i3/007>.
18. Tomshin M.D., Lelyukh M.I., Mishenin S.G., Suntsova S.P., Kopylova A.G., Ubinin S.G. Schematic evolution of trappean magmatism on the eastern side of the Tungus syncline. *Otechestvennaya Geologiya*. 2001;5:19-24. (In Russ.). EDN: DHDAYX.
19. Kravchinsky V.A., Konstantinov K.M., Courtillot V., Savrasov J.I., Valet J.-P., Cherniy S.D., et al. Paleomagnetism of East Siberian traps and kimberlites: two new poles and paleogeographic reconstructions at about 360 and 250 Ma. *Geophysical Journal International*. 2002;148(1):1-33. <https://doi.org/10.1046/j.0956-540x.2001.01548.x>.
20. Konstantinov K.M., Mishenin S.G., Tomshin M.D., Kornilova V.P., Koval'chuk O.E. Petromagnetic inhomogeneities of the Permian-Triassic traps of the Dalyn-Alakit diamond-bearing region (Western Yakutia). *Lithosphere (Russia)*. 2014;2:77-98. (In Russ.). EDN: SGPOVZ.



21. Kirguez A.A., Konstantinov K.M., Kuzina D.M., Makarov A.A., Vasilyeva A.E. Petromagnetic klassification of the basis of the eastern board of the Tungus syneklis. *Journal Geophysics*. 2020;3:45-61. (In Russ.). EDN: FQKOIB.
22. Konstantinov K.M., Kuzina D.M., Khoroshikh M.S. Petrophysical taxa of diamond deposit of Komsomolskaya kimberlite pipe (Yakutsk diamondiferous province). *Earth sciences and subsoil use*. 2024;47(2):190-219. <https://doi.org/10.21285/2686-9993-2024-47-2-190-219>. EDN: TBAMTC.
23. Vasil'eva A.E., Tomshin M.D., Konstantinov K.M. Trap magmatism of the junction zone of the Tunguska syncline and the Anabar antecline. *Nauka i obrazovanie*. 2006;4:40-44. (In Russ.). EDN: KBCYDT.
24. Kutolin V.A. *Problems of basalt petrochemistry and petrology*. Novosibirsk: Nauka; 1972, 208 p. (In Russ.).
25. Kravchinskii A.Ya. *Paleomagnetism and paleogeographic evolution of continents*. Novosibirsk: Nauka; 1979, 264 p. (In Russ.).
26. Khramov A.N., Goncharov G.I., Komissarova R.A., Pisarevskii S.A., Pogarskaya I.A., Rzhetskii Yu.S. *Paleomagnetology*. Leningrad: Nedra; 312 p. (In Russ.).
27. Reichow M.K., Saunders A.D., White R.V., Pringle M.S., Al'mukhamedov A.I., Medvedev A.I., et al. $^{40}\text{Ar}/^{39}\text{Ar}$ dates from the West Siberian Basin: Siberian flood basalt province doubled. *Science*. 2002;296(5574):1846-1849. <https://doi.org/10.1126/science.1071671>.
28. Reichow M.K., Pringle M.S., Al'mukhamedov A.I., Allen M.B., Andreichev V.L., Buslov M.M., et al. The timing and extent of the eruption of the Siberian Traps large igneous province: Implications for the end-Permian environmental crisis. *Earth and Planetary Science Letters*. 2009;277(1-2):9-20. <https://doi.org/10.1016/j.epsl.2008.09.030>.
29. Renne P.R. Excess ^{40}Ar in biotite and hornblende from the Norilsk 1 intrusion, Siberia: implication for the age of Siberian Traps. *Earth and Planetary Science Letters*. 1995;131(3-4):165-176. [https://doi.org/10.1016/0012-821X\(95\)00015-5](https://doi.org/10.1016/0012-821X(95)00015-5).
30. Baksi A.K., Farrar E. $^{40}\text{Ar}/^{39}\text{Ar}$ dating of the Siberian Traps, USSR: evaluation of the ages of the two major extinction events relative to episodes of flood-basalt volcanism in USS and the Deccan Traps, India. *Geology*. 1991;19(5):461-464. [https://doi.org/10.1130/0091-7613\(1991\)019<0461:ADOTST>2.3.CO;2](https://doi.org/10.1130/0091-7613(1991)019<0461:ADOTST>2.3.CO;2).
31. Dalrymple G.B., Czamanske G.K., Fedorenko V.A., Simonov O.N., Lanphere M.A., Likhachev A.P. *Areconnaissance $^{40}\text{Ar}/^{39}\text{Ar}$ study of ore-bearing and related rocks, Siberian Russia*. *Geochimica et Cosmochimica Acta*. 1995;59(10):2071-2083. [https://doi.org/10.1016/0016-7037\(95\)00127-1](https://doi.org/10.1016/0016-7037(95)00127-1).
32. Basu A.R., Poreda R.J., Renne P.R., Teichmann F., Vasiliev Yu.R., Sobolev N.V., et al. High- ^3He plume origin and temporal-spatial evolution of the Siberian flood basalts. *Science*. 1995;269(5225):822-825. <https://doi.org/10.1126/science.269.5225.822>.
33. Ivanov A.V., He H., Yang L., Nikolaeva I.V., Palesskii S.V. $^{40}\text{Ar}/^{39}\text{Ar}$ dating of intrusive magmatism in the Angara-Taseevskaya syncline and its implication for duration of magmatism of the Siberian Traps. *Journal of Asian Earth Sciences*. 2009;35(1):1-12. <https://doi.org/10.1016/j.jseaes.2008.11.006>.
34. Venkatesan T.R., Kumar A., Gopalan K., Al'mukhamedov A.I. ^{40}Ar - ^{39}Ar age of Siberian basaltic volcanism. *Chemical Geology*. 1997;138(3-4):303-310. [https://doi.org/10.1016/S0009-2541\(97\)00006-5](https://doi.org/10.1016/S0009-2541(97)00006-5).
35. Renne P.R., Basu A.R. Rapid eruption of the Siberian Traps flood basalts at the Permo-Triassic boundary. *Science*. 1991;253(5016):176-179. <https://doi.org/10.1126/science.253.5016.176>.
36. Mundil R., Ludwig K.R., Metcalfe I., Renne P.R. Age and timing of the Permian mass extinctions: U/Pb dating of closed-system zircons. *Science*. 2004;305(5691):1760-1763. <https://doi.org/10.1126/science.1101012>.
37. Vernikovskiy V.A., Pease V.L., Vernikovskaya A.E., Romanov A.P., Gee D.G., Travin A.V. First report of early Triassic A-type granite and syenite intrusions from Taimyr: Product of the northern Eurasian superplume? *Lithos*. 2003;66(1):23-36. [https://doi.org/10.1016/S0024-4937\(02\)00192-5](https://doi.org/10.1016/S0024-4937(02)00192-5).
38. Svensen H., Planke S., Polozov A.G., Schmidbauer N., Corfu F., Podladchikov Y.Y., et al. Siberian gas venting and the end-Permian environmental crisis. *Earth and Planetary Science Letters*. 2009;277(3):490-500. <https://doi.org/10.1016/j.epsl.2008.11.015>.
39. Kuzmichev A.B., Pease V.L. Siberian trap magmatism on the New Siberian Islands: constraints for Arctic Mesozoic plate tectonic reconstructions. *Journal of the Geological Society*. 2007;164(5):959-968. <https://doi.org/10.1144/0016-76492006-090>.
40. Kamo S.L., Czamanske G.K., Krogh T.E. A minimum U-Pb age for Siberian flood-basalt volcanism. *Geochimica et Cosmochimica Acta*. 1996;60(18):3505-3511. [https://doi.org/10.1016/0016-7037\(96\)00173-1](https://doi.org/10.1016/0016-7037(96)00173-1).
41. Kamo S.L., Czamanske G.K., Amelin Yu., Fedorenko V.A., Davis D.W., Trofimov V.R. Rapid eruption of Siberian flood volcanic rocks and evidence for coincidence with the Permian-Triassic boundary and mass extinction at 251 Ma. *Earth and Planetary Science Letters*. 2003;214(1-2):75-91. [https://doi.org/10.1016/S0012-821X\(03\)00347-9](https://doi.org/10.1016/S0012-821X(03)00347-9).
42. Vladimirov A.G., Kozlov M.S., Shokal'skii S.P., Khalilov V.A., Rudnev S.N., Kruk N.N., et al. Major epochs of intrusive magmatism of Kuznetsk Alatau, Altai, and Kalba (from U-Pb isotope dates). *Geologiya i geofizika*. 2001;42(8):1157-1178. (In Russ.). EDN: MQEUST.
43. Vernikovskaya A.E., Vernikovskiy V.A., Matushkin N.Y., Romanova I.V., Berejnaya N.G., Larionov A.N., et al. Middle paleozoic and early mesozoic anorogenic magmatism of the South Yenisei ridge: first geochemical and geochronological data. *Geologiya i geofizika*. 2010;51(5):701-716. (In Russ.). EDN: MKTVLV.
44. Yin H., Zhang K., Tong J., Yang Z., Wu S. The global stratotype section and point (GSSP) of the Permian-Triassic boundary. *Episodes*. 2001;24(2):102-114. <https://doi.org/10.18814/epiugs/2001/v24i2/004>.
45. Yin H. On the transitional Bed and the Permian-Triassic boundary in South China. *Newsletter on Stratigraphy*. 1985;15(1):13-27. <https://doi.org/10.1127/nos/15/1985/13>.
46. Yin H. Reassessment of the index fossils at the Paleozoic-Mesozoic boundary: Palaeoworld, Palaeontology and Stratigraphy Report, Nanjing Institute of Geology and Palaeontology. *Academia Sinica*. 1994;4:153-171.



47. Sheng J., Chen C., Wang Y., Rui L., Liao Z., Bando Y., et al. Permian Triassic boundary in middle and eastern Tethys. *Journal of Faculty of Sciences*. 1984;21(1):133-181.
48. Sheng J., Chen C., Wang Y., Rui L., Liao Z., He J., et al. New advances on the Permian and Triassic boundary of Jiangsu, Zhejiang and Anhui. In: *Stratigraphy and palaeontology of systemic boundaries in China, Permian-Triassic boundary*. Nanjing: Nanjing University Press; 1987, p. 1-22. (In Chinese).
49. Wang C. A conodont-based high-resolution eventostratigraphy and biostratigraphy for the Permian-Triassic boundaries in South China: Palaeoworld, Palaeontology and Stratigraphy. *Academia Sinica*. 1994;4:234-248.
50. Zheng Q.F., Cao C.Q., Zhang M.Y. Sedimentary features of the Permian-Triassic boundary sequence of the Meishan section in Changxing County, Zhejiang Province. *Science China Earth Sciences*. 2013;56:956-969. <https://doi.org/10.1007/s11430-013-4602-9>.
51. Berman H.M. The Protein Data Bank: a historical perspective. *Acta Crystallographica Section A: Foundations of Crystallography*. 2008;64(1):88-95. <https://doi.org/10.1107/S0108767307035623>.
52. Mundil R.L., Metcalfe I., Ludwig K.R., Renne P.R., Oberli F., Nicoll R.S. Timing of the Permian-Triassic biotic crisis: implications from new zircon U/Pb age data (and their limitations). *Earth and Planetary Science Letters*. 2001;187(1-2):131-145.
53. Mundil R., Pálffy J., Renne P.R., Brack P. The Triassic timescale: new constraints and a review of geochronological data. In: Lucas S.G. (ed.). *The Triassic Timescale: Geological Society*. London: Special Publication; 2010, p. 41-60. <https://doi.org/10.1144/SP334.3>.
54. Claoue-Long J.C., Zhang Z.C., Ma G.G., Du S.H. The age of the Permian-Triassic boundary. *Earth and Planetary Science Letters*. 1991;105(1-3):182-190. [https://doi.org/10.1016/0012-821X\(91\)90129-6](https://doi.org/10.1016/0012-821X(91)90129-6).
55. Renne P.R., Zhang Z., Richards M.A., Black M.T., Basu A.R. Synchrony and causal relations between Permian-Triassic boundary crisis and Siberian flood volcanism. *Science*. 1995;269(5229):1413-1416. <https://doi.org/10.1126/science.269.5229.1413>.
56. Bowring S.A., Erwin D.H., Jin Y.G., Martin M.W., Davidov K., Wang W. U/Pb zircon geochronology and tempo of the end-Permian mass extinction. *Science*. 1998;280(5366):1039-1045. <https://doi.org/10.1126/science.280.5366.1039>.
57. Metcalfe I., Nicoll R.S., Black L.P., Mundil R., Renne P., Jagodzinski E.A., et al. Isotope geochronology of the Permian-Triassic boundary and mass extinction in South China. In: Hongfu Y., Tong J. (eds). *Pangea and the Paleozoic-Mesozoic transition*. Wuhan: China University of Geosciences Press; 1999, p. 134-137.
58. Zhu Y., Liu Y. Magnetostratigraphy of the Permo-Triassic boundary section at Meishan, Changxing, Zhejiang Province. In: Yin H., Tong J. (eds). *Pangea and the Paleozoic-Mesozoic transition*. Wuhan: China University of Geosciences Press; 1999, p. 79-84.
59. Li H., Wang J. Magnetostratigraphy of Permo-Triassic boundary section of Meishan of Changxing, Zhejiang. *Scientia Sinica: Series B*. 1989;32(11):1401-1408.
60. Heller F., Chen H., Dobson J., Haag M. Permian-Triassic magnetostratigraphy new results from South China. *Physics of the Earth and Planetary Interiors*. 1995;89(3-4):281-295. [https://doi.org/10.1016/0031-9201\(94\)02993-L](https://doi.org/10.1016/0031-9201(94)02993-L).
61. Meng X., Hu C., Wang W., Liu H. Magnetostratigraphic study of Meishan Permian-Triassic section, Changxing, Zhejiang Province, China. *Journal of Earth Science*. 2000;11(3):361-365.
62. Min Z., Qin H.-F., He K., Hou Y.-F., Zheng Q.-F., Deng C.-L., et al. Magnetostratigraphy across the end-Permian mass extinction event from the Meishan sections, southeastern China. *Geology*. 2021;49(11):1289-1294. <https://doi.org/10.1130/G49072.1>.
63. Yuan D.X., Shen S.Z., Henderson C.M., Jun C., Hua Z., Feng H.Z. Revised conodont-based integrated high-resolution timescale for the Changhsingian Stage and end-Permian extinction interval at the Meishan sections, South China. *Lithos*. 2014;204:220-245. <https://doi.org/10.1016/j.lithos.2014.03.026>.
64. Burgess S.D., Bowring S.A., Shen S.Z. High-precision timeline for Earth's most severe extinction. *Proceedings of the National Academy of Sciences of the United States of America*. 2014;111(9):3316-3321. <https://doi.org/10.1073/pnas.1317692111>.
65. Shen S.Z., Crowley J.L., Yue W., Bowring S.A., Erwin D.H., Sadler P.M., et al. Calibrating the end-Permian mass extinction. *Science*. 2011;334(6061):1367-1372. <https://doi.org/10.1126/science.1213454>.
66. Konstantinov K.M., Kuzina D.M., Khoroshikh M.S. Petrophysical taxa of diamond deposit of Komsomolskaya kimberlite pipe (Yakutsk diamondiferous province). *Earth sciences and subsoil use*. 2024;47(2):190-219. <https://doi.org/10.21285/2686-9993-2024-47-2-190-219>. EDN: TBAMTC.
67. Travin A.V., Yudin D.S., Vladimirov A.G., Khromykh S.V., Volkova N.I., Mekhonoshin A.S., et al. Thermochronology of the Chernorud granulite zone, Ol'khon region, Western Baikal Area. *Geohimiya*. 2009;11:1181-1199. (In Russ.). EDN: KXLBPT.
68. Latyshev A.V., Veselovskiy R.V., Ivanov A.V. Paleomagnetism of the Permian-Triassic intrusions from the Tunguska syncline and the Angara-Taseeva depression, Siberian Traps Large Igneous Province: evidence of contrasting styles of magmatism. *Tectonophysics*. 2018;723:41-55. <https://doi.org/10.1016/j.tecto.2017.11.035>.
69. Glen J.M.G., Nomade S., Lyons J.J., Metcalfe I., Mundil R., Renne P.R. Magnetostratigraphic correlations of Permian-Triassic marine-to-terrestrial sections from China. *Journal of Asian Earth Sciences*. 2009;36(6):521-540. <https://doi.org/10.1016/j.jseaes.2009.03.003>.
70. Zakharov Yu.D., Sokarev A.N. Permian-Triassic paleomagnetism of Eurasia. In: *Proceedings of the International Symposium on Shallow Tethys*. 20-23 September 1990, Sendai. Sendai: The Saito Gratitude Foundation; 1991, vol. 3, p. 313-323.



71. Gallet Y., Krystyn L., Besse J., Saidi A., Ricou L.E. New constraints on the Upper Permian and Lower Triassic geomagnetic polarity timescale from the Abadeh section (central Iran). *Journal of Geophysical Research Solid Earth*. 2000;105(B2):2805-2815. <https://doi.org/10.1029/1999JB900218>.
72. De Kock M.O., Kirschvink J.L. Paleomagnetic constraints on the Permian–Triassic boundary in terrestrial strata of the Karoo Supergroup, South Africa: implications for causes of the end-Permian extinction event. *Gondwana Research*. 2004;7(1):175-183. [https://doi.org/10.1016/S1342-937X\(05\)70316-6](https://doi.org/10.1016/S1342-937X(05)70316-6).
73. Hounslow M.W., Mork A., Peters C., Weitschat W. Boreal Lower Triassic magnetostratigraphy from Deltadalen, Central Svalbard. *Albertiana*. 1996;17:3-10.
74. Nawrocki J. Permian to Early Triassic magnetostratigraphy from the Central European Basin in Poland: implications on regional and worldwide correlations. *Earth and Planetary Science Letters*. 1997;152(1-4):37-58. [https://doi.org/10.1016/S0012-821X\(97\)00147-7](https://doi.org/10.1016/S0012-821X(97)00147-7).
75. Szurlics M., Bachmann G.H., Menning M., Nowaczyk N.R., Kaeding K.C. Magnetostratigraphy and high-resolution lithostratigraphy of the Permian–Triassic boundary interval in central Germany. *Earth and Planetary Science Letters*. 2003;212(3-4):263-278. [https://doi.org/10.1016/S0012-821X\(03\)00288-7](https://doi.org/10.1016/S0012-821X(03)00288-7).
76. Scholger R., Mauritsch H.J., Brandner R. Permian–Triassic boundary magnetostratigraphy from the Southern Alps (Italy). *Earth and Planetary Science Letters*. 2000;176(3-4):495-508. [https://doi.org/10.1016/S0012-821X\(00\)00026-1](https://doi.org/10.1016/S0012-821X(00)00026-1).
77. Molostovskii A. E., Khramov A. N. Paleomagnetic scale of the Phanerozoic and problems of magnetostratigraphy. In: *Stratigraphy. Reports*. Moscow: Nauka; 1984, vol. 1, p. 16-23. (In Russ.).
78. Kazanskii A.Yu., Kazanskii Yu.P., Saraev S.V., Moskvina V.I. The Permo-Triassic boundary in volcanosedimentary section of the West-Siberian plate according to paleomagnetic data: (from studies of the core from the Tyumenskaya superdeep borehole SD-6). *Geologiya i geofizika*. 2000;41(3):327-339. (In Russ.). EDN: VZVSPQ.
79. Konstantinov K.M., Tomshin M.D., Khoroshikh M.S. Magnetoelastic effect of kimberlite host rocks (Yakutsk diamondiferous province). *Earth sciences and subsoil use*. 2023;46(4):344-363. (In Russ.) <https://doi.org/10.21285/2686-9993-2023-46-4-344-363>. EDN: GNUMPH.

Список источников

1. Лурье М.Л., Полунина Л.Н., Туганова Е.В. Принципы расчленения интрузивов позднепалеозойско-раннемезозойской «трапповой» формации Сибирской платформы // *Петрология и металлогения базитов* / под ред. Г.Д. Афанасьева. М.: Наука, 1973. С. 116–126.
2. Золотухин В.В., Виленский А.М., Дюжиков О.А. Базальты Сибирской платформы. Новосибирск: Наука, 1986, 245 с.
3. Л.М. Парфенов, М.И. Кузьмин. Тектоника, геодинамика и металлогения территории Республики Саха (Якутия). М.: МАИК «Наука/Интерпериодика», 2001. 517 с.
4. Поляков Г.П. Траппы Сибири и Декана: черты сходства и различия. Новосибирск: Наука, 1991. 216 с.
5. Альмухамедов А.И., Медведев А.Я., Золотухин В.В. Вещественная эволюция пермотриасовых базальтов Сибирской платформы во времени и пространстве // *Петрология*. 2004. Т. 12. № 4. С. 339–353. EDN: OXNOKZ.
6. Масайтис В.Л. Пермский и триасовый вулканизм Сибири: проблемы динамических реконструкций // *Записки Всесоюзного минералогического общества*. 1983. Т. 112. № 4. С. 412–425.
7. Добрецов Н.Л., Борисенко А.С., Изох А.Э., Жмодик С.М. Термохимическая модель пермотриасовых мантийных плюмов Евразии как основа для выявления закономерностей формирования и прогноза медно-никелевых, благородно- и редкометалльных месторождений // *Геология и геофизика*. 2010. № 9. С. 1159–1187. EDN: MVSOEF.
8. Fedorenko V.I., Lightfoot P.C., Naldrett A.J., Czamanske G.K., Hawkesworth C.J., Wooden J.L., et al. Petrogenesis of the floodbasalt sequence at Noril'sk, North Central Siberia // *International Geology Review*. 1996. Vol. 38. Iss. 2. P. 99–135.
9. Олейников Б.В. Геохимическая типизация платформенных базитов // *Геохимия и минералогия базитов и ультрабазитов Сибирской платформы* / под ред. В.В. Ковальского, К.А. Лазебник, К.Н. Никишова. Якутск: Изд-во ЯФ СО АН СССР, 1984. С. 4–21.
10. Томшин М.Д., Копылова А.Г., Тянь О.А. Петрохимическое разнообразие траппов восточной периферии Тунгусской синеклизы // *Геология и геофизика*. 2005. Т. 46. № 1. С. 72–82. EDN: MUMSTD.
11. Campbell I.H., Czamanske G.K., Fedorenko V.A., Hill R.I., Stepanov V. Synchronism of the Siberian traps and the Permian–Triassic boundary // *Science*. 1992. Vol. 258. Iss. 5089. P. 1760–1763. <https://doi.org/10.1126/science.258.5089.1760>.
12. Wilson J.T. A possible origin of the Hawaiian Islands // *Canadian Journal of Physics*. 1963. Vol. 41. Iss. 6. P. 863–870. <https://doi.org/10.1139/p63-094>.
13. Kuzmin M.I., Yarmolyuk V.V., Kravchinsky V.A. Phanerozoic hot spot traces and paleogeographic reconstructions of the Siberian continent based on interaction with the African large low shear velocity province // *Earth-Science Reviews*. 2010. Vol. 102. Iss. 1. P. 29–59. <https://doi.org/10.1016/j.earscirev.2010.06.004>.
14. Патон М.Т., Иванов А.В., Фиорентини М.Л., Мак-Наугтон Н.Ж., Мудровская И., Резницкий Л.З. [и др.]. Позднепермские и раннетриасовые магматические импульсы в Ангаро-Тасеевской синклинали, Южно-Сибирские траппы и их возможное влияние на окружающую среду // *Геология и геофизика*. 2010. Т. 51. № 9. С. 1298–1309. EDN: MVSOGX.



15. Scotese C.R., Langford R.P. Pangea and the paleogeography of the Permian // *The Permian of northern Pangea* / eds P.A. Scholle, T.M. Peryt, D.S. Ulmer-Scholle. Berlin: Springer-Verlag, 1995. P. 3–19. https://doi.org/10.1007/978-3-642-78593-1_1.
16. Torsvik T.H., Cocks L.R. Triassic // *Earth history and palaeogeography* / T.H. Torsvik, L.R. Cocks. Cambridge: Cambridge University Press, 2016. P. 138–158. <https://doi.org/10.1017/9781316225523.012>.
17. Remane J., Bassett M.G., Cowie J.W., Gohrbandt K.H., Lane H.R., Michelsen O., et al. Revised guidelines for the establishment of global chronostratigraphic standards by the International Commission on Stratigraphy (ICS) // *Episodes*. 1996. Vol. 19. Iss. 3. P. 77–81. <https://doi.org/10.18814/epiiugs/1996/v19i3/007>.
18. Томшин М.Д., Лелюх М.И., Мишенин С.Г., Сунцова С.П., Копылова А.Г., Убинин С.Г. Схема развития траппового магматизма восточного борта Тунгусской синеклизы // *Отечественная геология*. 2001. № 5. С. 19–24. EDN: DHDAYX.
19. Kravchinsky V.A., Konstantinov K.M., Courtillot V., Savrasov J.I., Valet J-P., Cherniy S.D., et al. Paleomagnetism of East Siberian traps and kimberlites: two new poles and paleogeographic reconstructions at about 360 and 250 Ma // *Geophysical Journal International*. 2002. Vol. 148. Iss. 1. P. 1–33. <https://doi.org/10.1046/j.0956-540x.2001.01548.x>.
20. Константинов К.М., Мишенин С.Г., Томшин М.Д., Корнилова В.П., Ковальчук О.Е. Петромагнитные неоднородности пермотриасовых траппов Далдыно-Алаkitского алмазоносного района (Западная Якутия) // *Литосфера*. 2014. № 2. С. 77–98. EDN: SGPOVZ.
21. Киргуев А.А., Константинов К.М., Кузина Д.М., Макаров А.А., Васильева А.Е. Петромагнитная классификация базитов восточного борта Тунгусской синеклизы // *Геофизика*. 2020. № 3. С. 45–61. EDN: FQKOIB.
22. Konstantinov K.M., Kuzina D.M., Khoroshikh M.S. Petrophysical taxa of diamond deposit of Komsomolskaya kimberlite pipe (Yakutsk diamondiferous province) // *Науки о Земле и недропользование*. 2024. Т. 47. № 2. С. 190–219. <https://doi.org/10.21285/2686-9993-2024-47-2-190-219>. EDN: ТВАМТС.
23. Васильева А.Е., Томшин М.Д., Константинов К.М. Трапповый магматизм зоны сочленения Тунгусской синеклизы и Анабарской антеклизы // *Наука и образование*. 2006. № 4. С. 40–44. EDN: KBCYDT.
24. Кутолин В.А. Проблемы петрохимии и петрологии базальтов. Новосибирск: Наука, 1972. 208 с.
25. Кравчинский А.Я. Палеомагнетизм и палеогеографическая эволюция континентов. Новосибирск: Наука, 1979. 264 с.
26. Храмов А.Н., Гончаров Г.И., Комиссарова Р.А., Писаревский С.А., Погарская И.А., Ржевский Ю.С. [и др.]. Палеомагнитология. Л.: Недра, 1982. 312 с.
27. Reichow M.K., Saunders A.D., White R.V., Pringle M.S., Al'mukhamedov A.I., Medvedev A.I., et al. $^{40}\text{Ar}/^{39}\text{Ar}$ dates from the West Siberian Basin: Siberian flood basalt province doubled // *Science*. 2002. Vol. 296. Iss. 5574. P. 1846–1849. <https://doi.org/10.1126/science.1071671>.
28. Reichow M.K., Pringle M.S., Al'Mukhamedov A.I., Allen M.B., Andreichev V.L., Buslov M.M., et al. The timing and extent of the eruption of the Siberian Traps large igneous province: Implications for the end-Permian environmental crisis // *Earth and Planetary Science Letters*. 2009. Vol. 277. Iss. 1–2. P. 9–20. <https://doi.org/10.1016/j.epsl.2008.09.030>.
29. Renne P.R. Excess ^{40}Ar in biotite and hornblende from the Norilsk 1 intrusion, Siberia: implication for the age of Siberian Traps // *Earth and Planetary Science Letters*. 1995. Vol. 131. Iss. 3–4. P. 165–176. [https://doi.org/10.1016/0012-821X\(95\)00015-5](https://doi.org/10.1016/0012-821X(95)00015-5).
30. Baksi A.K., Farrar E. $^{40}\text{Ar}/^{39}\text{Ar}$ dating of the Siberian Traps, USSR: evaluation of the ages of the two major extinction events relative to episodes of flood-basalt volcanism in USSR and the Deccan Traps, India // *Geology*. 1991. Vol. 19. Iss. 5. P. 461–464. [https://doi.org/10.1130/0091-7613\(1991\)019<0461:ADOTST>2.3.CO;2](https://doi.org/10.1130/0091-7613(1991)019<0461:ADOTST>2.3.CO;2).
31. Dalrymple G.B., Czamanske G.K., Fedorenko V.A., Simonov O.N., Lanphere M.A., Likhachev A.P. A reconnaissance $^{40}\text{Ar}/^{39}\text{Ar}$ study of ore-bearing and related rocks, Siberian Russia // *Geochimica et Cosmochimica Acta*. 1995. Vol. 59. Iss. 10. P. 2071–2083. [https://doi.org/10.1016/0016-7037\(95\)00127-1](https://doi.org/10.1016/0016-7037(95)00127-1).
32. Basu A.R., Poreda R.J., Renne P.R., Teichmann F., Vasiliev Yu.R., Sobolev N.V., et al. High- ^3He plume origin and temporal-spatial evolution of the Siberian flood basalts // *Science*. 1995. Vol. 269. Iss. 5225. P. 822–825. <https://doi.org/10.1126/science.269.5225.822>.
33. Ivanov A.V., He H., Yang L., Nikolaeva I.V., Paleskii S.V. $^{40}\text{Ar}/^{39}\text{Ar}$ dating of intrusive magmatism in the Angara-Taseevskaya syncline and its implication for duration of magmatism of the Siberian Traps // *Journal of Asian Earth Sciences*. 2009. Vol. 35. Iss. 1. P. 1–12. <https://doi.org/10.1016/j.jseaes.2008.11.006>.
34. Venkatesan T.R., Kumar A., Gopalan K., Al'mukhamedov A.I. $^{40}\text{Ar}-^{39}\text{Ar}$ age of Siberian basaltic volcanism // *Chemical Geology*. 1997. Vol. 138. Iss. 3–4. P. 303–310. [https://doi.org/10.1016/S0009-2541\(97\)00006-5](https://doi.org/10.1016/S0009-2541(97)00006-5).
35. Renne P.R., Basu A.R. Rapid eruption of the Siberian Traps flood basalts at the Permo-Triassic boundary // *Science*. 1991. Vol. 253. Iss. 5016. P. 176–179. <https://doi.org/10.1126/science.253.5016.176>.
36. Mundil R., Ludwig K.R., Metcalfe I., Renne P.R. Age and timing of the Permian mass extinctions: U/Pb dating of closed-system zircons // *Science*. 2004. Vol. 305. Iss. 5691. P. 1760–1763. <https://doi.org/10.1126/science.1101012>.
37. Vernikovskiy V.A., Pease V.L., Vernikovskaya A.E., Romanov A.P., Gee D.G., Travin A.V. First report of early Triassic A-type granite and syenite intrusions from Taimyr: Product of the northern Eurasian superplume? // *Lithos*. 2003. Vol. 66. Iss. 1. P. 23–36. [https://doi.org/10.1016/S0024-4937\(02\)00192-5](https://doi.org/10.1016/S0024-4937(02)00192-5).
38. Svensen H., Planke S., Polozov A.G., Schmidbauer N., Corfu F., Podladchikov Y.Y., et al. Siberian gas venting and the end-Permian environmental crisis // *Earth and Planetary Science Letters*. 2009. Vol. 277. Iss. 3. P. 490–500. <https://doi.org/10.1016/j.epsl.2008.11.015>.



39. Kuzmichev A.B., Pease V.L. Siberian trap magmatism on the New Siberian Islands: constraints for Arctic Mesozoic plate tectonic reconstructions // *Journal of the Geological Society*. 2007. Vol. 164. Iss. 5. P. 959–968. <https://doi.org/10.1144/0016-76492006-090>.
40. Kamo S.L., Czamanske G.K., Krogh T.E. A minimum U-Pb age for Siberian flood-basalt volcanism // *Geochimica et Cosmochimica Acta*. 1996. Vol. 60. Iss. 18. P. 3505–3511. [https://doi.org/10.1016/0016-7037\(96\)00173-1](https://doi.org/10.1016/0016-7037(96)00173-1).
41. Kamo S.L., Czamanske G.K., Amelin Yu., Fedorenko V.A., Davis D.W., Trofimov V.R. Rapid eruption of Siberian flood volcanic rocks and evidence for coincidence with the Permian-Triassic boundary and mass extinction at 251 Ma // *Earth and Planetary Science Letters*. 2003. Vol. 214. Iss. 1–2. P. 75–91. [https://doi.org/10.1016/S0012-821X\(03\)00347-9](https://doi.org/10.1016/S0012-821X(03)00347-9).
42. Владимиров А.Г., Козлов М.С., Шокальский С.П., Халилов В.А., Руднев С.Н., Крук Н.Н. [и др.]. Основные возрастные рубежи интрузивного магматизма Кузнецкого Алатау и Калбы (по данным U-Pb изотопного датирования) // *Геология и геофизика*. 2001. Т. 42. № 8. С. 1157–1178. EDN: MQEUST.
43. Верниковская А.Е., Верниковский В.А., Матушкин Н.Ю., Романова И.В., Бережная Н.Г., Ларионов А.Н. [и др.]. Среднепалеозойский и раннемезозойский анорогенный магматизм Южно-Енисейского кряжа: первые геохимические и геохронологические данные // *Геология и геофизика*. 2010. Т. 51. № 5. С. 701–716. EDN: MKTVLV.
44. Yin H., Zhang K., Tong J., Yang Z., Wu S. The global stratotype section and point (GSSP) of the Permian-Triassic boundary // *Episodes*. 2001. Vol. 24. Iss. 2. P. 102–114. <https://doi.org/10.18814/epiugs/2001/v24i2/004>.
45. Yin H. On the transitional Bed and the Permian-Triassic boundary in South China // *Newsletter on Stratigraphy*. 1985. Vol. 15. Iss. 1. P. 13–27. <https://doi.org/10.1127/nos/15/1985/13>.
46. Yin H. Reassessment of the index fossils at the Paleozoic-Mesozoic boundary: Palaeoworld, Palaeontology and Stratigraphy Report, Nanjing Institute of eology and Palaeontology // *Academia Sinica*. 1994. Iss. 4. P. 153–171.
47. Sheng J., Chen C., Wang Y., Rui L., Liao Z., Bando Y., et al. Permian Triassic boundary in middle and eastern Tethys // *Journal of Faculty of Sciences*. 1984. Vol. 21. Iss. 1. P. 133–181.
48. Sheng J., Chen C., Wang Y., Rui L., Liao Z., He J., et al. New advances on the Permian and Triassic boundary of Jiangsu, Zhejiang and Anhui // *Stratigraphy and palaeontology of systemic boundaries in China, Permian-Triassic boundary*. Nanjing: Nanjing University Press, 1987. P. 1–22.
49. Wang C. A conodont-based high-resolution eventostratigraphy and biostratigraphy for the Permian-Triassic boundaries in South China: Palaeoworld, Palaeontology and Stratigraphy // *Academia Sinica*. 1994. Iss. 4. P. 234–248.
50. Zheng Q.F., Cao C.Q., Zhang M.Y. Sedimentary features of the Permian-Triassic boundary sequence of the Meishan section in Changxing County, Zhejiang Province // *Science China Earth Sciences*. 2013. Vol. 56. P. 956–969. <https://doi.org/10.1007/s11430-013-4602-9>.
51. Berman H.M. The Protein Data Bank: a historical perspective // *Acta Crystallographica Section A: Foundations of Crystallography*. 2008. Vol. 64. Iss. 1. P. 88–95. <https://doi.org/10.1107/S0108767307035623>.
52. Mundil R.L., Metcalfe I., Ludwig K.R., Renne P.R., Oberli F., Nicoll R.S. Timing of the Permian-Triassic biotic crisis: implications from new zircon U/Pb age data (and their limitations) // *Earth and Planetary Science Letters*. 2001. Vol. 187. Iss. 1–2. P. 131–145.
53. Mundil R., Pálffy J., Renne P.R., Brack P. The Triassic timescale: new constraints and a review of geochronological data // *The Triassic Timescale: Geological Society / ed. S.G. Lucas*. London: Special Publication, 2010. P. 41–60. <https://doi.org/10.1144/SP334.3>.
54. Claeue-Long J.C., Zhang Z.C., Ma G.G., Du S.H. The age of the Permian-Triassic boundary // *Earth and Planetary Science Letters*. 1991. Vol. 105. Iss. 1–3. P. 182–190. [https://doi.org/10.1016/0012-821X\(91\)90129-6](https://doi.org/10.1016/0012-821X(91)90129-6).
55. Renne P.R., Zhang Z., Richards M.A., Black M.T., Basu A.R. Synchrony and causal relations between Permian-Triassic boundary crisis and Siberian flood volcanism // *Science*. 1995. Vol. 269. Iss. 5229. P. 1413–1416. <https://doi.org/10.1126/science.269.5229.1413>.
56. Bowring S.A., Erwin D.H., Jin Y.G., Martin M.W., Davidov K., Wang W. U/Pb zircon geochronology and tempo of the end-Permian mass extinction // *Science*. 1998. Vol. 280. Iss. 5366. P. 1039–1045. <https://doi.org/10.1126/science.280.5366.1039>.
57. Metcalfe I., Nicoll R.S., Black L.P., Mundil R., Renne P., Jagodzinski E.A., et al. Isotope geochronology of the Permian-Triassic boundary and mass extinction in South China // *Pangea and the Paleozoic-Mesozoic transition / eds Y. Hongfu, J. Tong*. Wuhan: China University of Geosciences Press, 1999. P. 134–137.
58. Zhu Y., Liu Y. Magnetostratigraphy of the Permo-Triassic boundary section at Meishan, Changxing, Zhejiang Province // *Pangea and the Paleozoic-Mesozoic transition / eds H. Yin, J. Tong*. Wuhan: China University of Geosciences Press, 1999. P. 79–84.
59. Li H., Wang J. Magnetostratigraphy of Permo-Triassic boundary section of Meishan of Changxing, Zhejiang // *Scientia Sinica: Series B*. 1989. Vol. 32. Iss. 11. P. 1401–1408.
60. Heller F., Chen H., Dobson J., Haag M. Permian-Triassic magnetostratigraphy new results from South China // *Physics of the Earth and Planetary Interiors*. 1995. Vol. 89. Iss. 3–4. P. 281–295. [https://doi.org/10.1016/0031-9201\(94\)02993-L](https://doi.org/10.1016/0031-9201(94)02993-L).
61. Meng X., Hu C., Wang W., Liu H. Magnetostratigraphic study of Meishan Permian-Triassic section, Changxing, Zhejiang Province, China // *Journal of Earth Science*. 2000. Vol. 11. Iss. 3. P. 361–365.
62. Min Z., Qin H.-F., He K., Hou Y.-F., Zheng Q.-F., Deng C.-L., et al. Magnetostratigraphy across the end-Permian mass extinction event from the Meishan sections, southeastern China // *Geology*. 2021. Vol. 49. Iss. 11. P. 1289–1294. <https://doi.org/10.1130/G49072.1>.
63. Yuan D.X., Shen S.Z., Henderson C.M., Jun C., Hua Z., Feng H.Z. Revised conodont-based integrated high-resolution timescale for the Changhsingian Stage and end-Permian extinction interval at the Meishan sections, South China // *Lithos*. 2014. Vol. 204. P. 220–245. <https://doi.org/10.1016/j.lithos.2014.03.026>.



64. Burgess S.D., Bowring S.A., Shen S.Z. High-precision timeline for Earth's most severe extinction // *Proceedings of the National Academy of Sciences of the United States of America*. 2014. Vol. 111. Iss. 9. P. 3316–3321. <https://doi.org/10.1073/pnas.1317692111>.
65. Shen S.Z., Crowley J.L., Yue W., Bowring S.A., Erwin D.H., Sadler P.M., et al. Calibrating the end-Permian mass extinction // *Science*. 2011. Vol. 334. Iss. 6061. P. 1367–1372. <https://doi.org/10.1126/science.1213454>.
66. Konstantinov K.M., Kuzina D.M., Khoroshikh M.S. Petrophysical taxa of diamond deposit of Komsomolskaya kimberlite pipe (Yakutsk diamondiferous province) // *Науки о Земле и недропользование*. 2024. Т. 47. № 2. С. 190–219. <https://doi.org/10.21285/2686-9993-2024-47-2-190-219>. EDN: ТВАМТС.
67. Травин А.В., Юдин Д.С., Владимиров А.Г., Хромых С.В., Волкова Н.И., Мехоношин А.С. [и др.]. Термохронология Чернорудской гранулитовой зоны (Ольхонский регион, Западное Прибайкалье) // *Геохимия*. 2009. № 11. С. 1181–1199. EDN: KXLBPT.
68. Latyshev A.V., Veselovskiy R.V., Ivanov A.V. Paleomagnetism of the Permian-Triassic intrusions from the Tunguska syncline and the Angara-Taseeva depression, Siberian Traps Large Igneous Province: evidence of contrasting styles of magmatism // *Tectonophysics*. 2018. Vol. 723. P. 41–55. <https://doi.org/10.1016/j.tecto.2017.11.035>.
69. Glen J.M.G., Nomade S., Lyons J.J., Metcalfe I., Mundil R., Renne P.R. Magnetostratigraphic correlations of Permian–Triassic marine-to-terrestrial sections from China // *Journal of Asian Earth Sciences*. 2009. Vol. 36. Iss. 6. P. 521–540. <https://doi.org/10.1016/j.jseaes.2009.03.003>.
70. Zakharov Yu.D., Sokarev A.N. Permian–Triassic paleomagnetism of Eurasia // *Proceedings of the International Symposium on Shallow Tethys (Sendai, 20–23 September 1990)*. Sendai: The Saito Gratitude Foundation, 1991. Vol. 3. P. 313–323.
71. Gallet Y., Krystyn L., Besse J., Saidi A., Ricou L.E. New constraints on the Upper Permian and Lower Triassic geomagnetic polarity timescale from the Abadeh section (central Iran) // *Journal of Geophysical Research Solid Earth*. 2000. Vol. 105. Iss. B2. P. 2805–2815. <https://doi.org/10.1029/1999JB900218>.
72. De Kock M.O., Kirschvink J.L. Paleomagnetic constraints on the Permian–Triassic boundary in terrestrial strata of the Karoo Supergroup, South Africa: implications for causes of the end-Permian extinction event // *Gondwana Research*. 2004. Vol. 7. Iss. 1. P. 175–183. [https://doi.org/10.1016/S1342-937X\(05\)70316-6](https://doi.org/10.1016/S1342-937X(05)70316-6).
73. Hounslow M.W., Mork A., Peters C., Weitschat W. Boreal Lower Triassic magnetostratigraphy from Deltadalen, Central Svalbard // *Albertiana*. 1996. Vol. 17. P. 3–10.
74. Nawrocki J. Permian to Early Triassic magnetostratigraphy from the Central European Basin in Poland: implications on regional and worldwide correlations // *Earth and Planetary Science Letters*. 1997. Vol. 152. Iss. 1–4. P. 37–58. [https://doi.org/10.1016/S0012-821X\(97\)00147-7](https://doi.org/10.1016/S0012-821X(97)00147-7).
75. Szurlies M., Bachmann G.H., Menning M., Nowaczyk N.R., Kaeding K.C. Magnetostratigraphy and high-resolution lithostratigraphy of the Permian–Triassic boundary interval in central Germany // *Earth and Planetary Science Letters*. 2003. Vol. 212. Iss. 3–4. P. 263–278. [https://doi.org/10.1016/S0012-821X\(03\)00288-7](https://doi.org/10.1016/S0012-821X(03)00288-7).
76. Scholger R., Mauritsch H.J., Brandner R. Permian–Triassic boundary magnetostratigraphy from the Southern Alps (Italy) // *Earth and Planetary Science Letters*. 2000. Vol. 176. Iss. 3–4. P. 495–508. [https://doi.org/10.1016/S0012-821X\(00\)00026-1](https://doi.org/10.1016/S0012-821X(00)00026-1).
77. Молостовский А.Э., Храмов А.Н. Палеомагнитная шкала фанерозоя и проблемы магнитостратиграфии // *Стратиграфия. Доклады*. М.: Наука, 1984. Т. 1. С. 16–23.
78. Казанский А.Ю., Казанский Ю.П., Сараев С.В., Москвин В.И. Граница перми и триаса в вулканогенно-осадочном разрезе Западно-Сибирской плиты по палеомагнитным данным (по материалам изучения керна Тюменской сверхглубокой скважины SD-6) // *Геология и геофизика*. 2000. Т. 41. С. 327–339. EDN: VZVSPQ.
79. Константинов К.М., Томшин М.Д., Хороших М.С. Магнитоупругий эффект кимберлитовмещающих пород (Якутская алмазоносная провинция) // *Науки о Земле и недропользование*. 2023. Т. 46. № 4. С. 344–363. <https://doi.org/10.21285/2686-9993-2023-46-4-344-363>. EDN: GNUPHH.

Information about the authors / Информация об авторах



Konstantin M. Konstantinov,
 Dr. Sci. (Geol. & Mineral.),
 Head of the Geophysics Department,
 Siberian School of Geosciences,
 Irkutsk National Research Technical University,
 Irkutsk, Russia,

✉ konstantinovkm@ex.istu.edu
<https://orcid.org/0000-0002-1196-8776>

Константинов Константин Михайлович,
 доктор геолого-минералогических наук,
 руководитель департамента геофизики,
 институт «Сибирская школа геонаук»,
 Иркутский национальный исследовательский технический университет,
 г. Иркутск, Россия,
 ✉ konstantinovkm@ex.istu.edu
<https://orcid.org/0000-0002-1196-8776>

**Mikhail D. Tomshin,**

Cand. Sci. (Geol. & Mineral.),
Senior Researcher,
Head of the Geological Museum Laboratory,
Diamond and Precious Metal Geology Institute, Siberian Branch
of the Russian Academy of Sciences,
Yakutsk, Russia,

tmd@diamond.ysn.ru

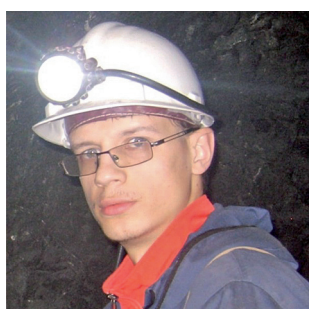
<https://orcid.org/0000-0001-5865-7521>

Томшин Михаил Дмитриевич,

кандидат геолого-минералогических наук,
старший научный сотрудник,
заведующий лабораторией «Геологический музей»,
Институт геологии алмаза и благородных металлов СО РАН,
г. Якутск, Россия,

tmd@diamond.ysn.ru

<https://orcid.org/0000-0001-5865-7521>

**Innokenty K. Konstantinov,**

Research Engineer,
Ore Geology Department,
Siberian School of Geosciences,
Irkutsk National Research Technical University,
Irkutsk, Russia,

geologiaforever@mail.ru

<https://orcid.org/0009-0009-5013-6241>

Константинов Иннокентий Константинович,

инженер-исследователь,
департамент рудной геологии,
институт «Сибирская школа геонаук»,
Иркутский национальный исследовательский технический университет,
г. Иркутск, Россия,

geologiaforever@mail.ru

<https://orcid.org/0009-0009-5013-6241>

**Anatoly N. Popov,**

Student,
Siberian School of Geosciences,
Irkutsk National Research Technical University,
Irkutsk, Russia,

anatoliy_popov_04@mail.ru

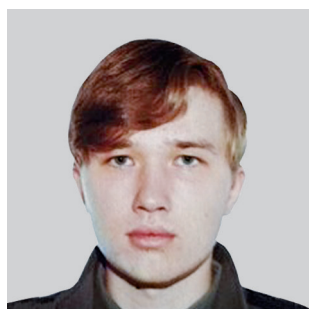
<https://orcid.org/0009-0008-7764-8100>

Попов Анатолий Николаевич,

студент,
институт «Сибирская школа геонаук»,
Иркутский национальный исследовательский технический университет,
г. Иркутск, Россия,

anatoliy_popov_04@mail.ru

<https://orcid.org/0009-0008-7764-8100>

**Veniamin E. Pozdniakov,**

Student,
Institute of High Technologies,
Laboratory Research Assistant at the Chemical Analytical Laboratory,
Siberian School of Geosciences,
Irkutsk National Research Technical University,
Irkutsk, Russia,

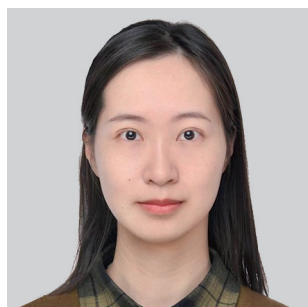
venya081004@gmail.com

<https://orcid.org/0009-0002-6006-9416>



Поздняков Вениамин Егорович,

студент,
 Институт высоких технологий,
 лаборант-исследователь химико-аналитической лаборатории,
 институт «Сибирская школа геонаук»,
 Иркутский национальный исследовательский технический университет,
 г. Иркутск, Россия,
venya081004@gmail.com
<https://orcid.org/0009-0002-6006-9416>

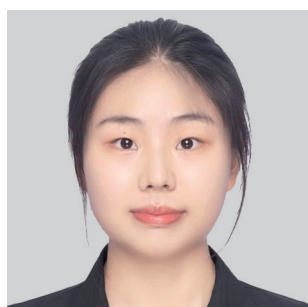


Shen Yi,

Student,
 School of Geography,
 Nanjing Normal University,
 Nanjing, China,
15962597891@163.com
<https://orcid.org/0009-0005-1961-5157>

И Шэнь,

студент,
 Школа географии,
 Нанкинский педагогический университет,
 г. Нанкин, Китай,
15962597891@163.com
<https://orcid.org/0009-0005-1961-5157>



Zitong Zhou,

Student,
 Institute of Foreign Languages,
 Nanjing University,
 Nanjing, China,
2496383208@qq.com
<https://orcid.org/0009-0000-7524-2723>

Чжоу Цзытун,

студент,
 Институт иностранных языков,
 Нанкинский университет,
 г. Нанкин, Китай,
2496383208@qq.com
<https://orcid.org/0009-0000-7524-2723>

Contribution of the authors / Вклад авторов

Konstantin M. Konstantinov – conceptualization, investigation, writing – original draft, writing – editing.

Mikhail D. Tomshin – investigation, writing – original draft, writing – editing.

Innokenty K. Konstantinov – investigation, formal analysis.

Anatoly N. Popov – investigation, visualization.

Veniamin E. Pozdniakov – investigation, visualization.

Shen Yi – investigation.

Zhou Zitong – investigation.

К.М. Константинов – разработка концепции, проведение исследования, написание черновика рукописи, редактирование рукописи.

М.Д. Томшин – проведение исследования, написание черновика рукописи, редактирование рукописи.

И.К. Константинов – проведение исследования, формальный анализ.

А.П. Попов – проведение исследования, визуализация.

В.Е. Поздняков – проведение исследования, визуализация.

И Шэнь – проведение исследования.

Ц. Чжоу – проведение исследования.

Conflict of interests / Конфликт интересов

The authors declare no conflicts of interests.

Авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов.



The final manuscript has been read and approved by all the co-authors.
Все авторы прочитали и одобрили окончательный вариант рукописи.

Information about the article / Информация о статье

The article was submitted 17.02.2025; approved after reviewing 25.02.2025; accepted for publication 03.03.2025.

Статья поступила в редакцию 17.02.2025; одобрена после рецензирования 25.02.2025; принята к публикации 03.03.2025.



GEOPHYSICS

Original article

EDN: TIYEQF

DOI: 10.21285/2686-9993-2025-48-2-185-203



Structural mapping and prospects identification in Otio oil field, Niger Delta

Mohammed A. Mohammed^a

^a*Irkutsk National Research Technical University, Irkutsk, Russia*

Abstract. This research presents a detailed structural mapping and prospects identification study of the Otio Field located in the Niger Delta. The study integrates 3D seismic data and well logs to delineate subsurface structures and assess the hydrocarbon potential of the field. Five key horizons were evaluated using petrophysical analysis, revealing porosity values ranging from 18 to 27 %, water saturation levels between 20 and 31 %, and Net-To-Gross ratios of 59 to 96 %. Time-depth structure maps were generated for each horizon, allowing for the identification of two prospects, namely the North-Eastern and South-Eastern prospects. The North-Eastern prospect was ranked higher due to its larger estimated hydrocarbon volume, with Sand E2 identified as the most promising reservoir based on volumetric analysis. This study underscores the importance of integrating seismic and petrophysical data for effective exploration and field development, providing a basis for future drilling decisions in the Otio Field. The research method started with the subsurface evaluation of the "Otio Field" integrating well log data from the field and seismic data spanning the field. The databases used for this project are three Dimensional (3D) seismic cube, base map, six well data in LAS format and check shot data for only one well. The results show the identified hydrocarbon bearing zones are Sands D, E1, E2, H and J as interpreted from gamma-ray and resistivity logs. The sand correlation across the field showed uniform sand development from well to well. The checkshot is interpreted as good because of the absence of outliers or spurious values. The plot is a gentle slope that eventually steepens because of com-paction of the underlying units that causes Two-Way Time to decrease. The results from the structural Interpretation, sixteen faults (F1–F16) were interpreted across the field as seen on seismic section. Faults in the field trend in the East-West direction with majority of them dipping north except for faults F4 F6, F7 and F9 dipping south. In the conclusion, the 3D structural analysis of Otio Field in the Niger Delta enhanced understanding of its structural styles and hydrocarbon traps. Eight reservoirs were identified, with five hydro-carbon-bearing sands (D, E1, E2, H, J) mapped, consisting of sands sealed by shales.

Keywords: Niger Delta, structural mapping, seismic interpretation, petrophysical analysis, hydrocarbon prospects, Otio Field

Acknowledgements: The author is grateful to his Director, A.V. Parshin, his colleagues and associates from the Institute of the Siberian School of Geosciences, Irkutsk National Research Technical University, Irkutsk, Russia, Department of Geology and Mining, University of Abuja, Abuja, Nigeria, and his research team: I.C. Ofia, S.L. Mohammed, M.G. Mohammed and her team and A.M. Abubakar for their undiluted support and assistance during and after carrying out this research.

For citation: Mohammed M.A. Structural mapping and prospects identification in Otio oil field, Niger Delta. *Earth sciences and subsoil use*. 2025;48(2):185-203. <https://doi.org/10.21285/2686-9993-2025-48-2-185-203>. EDN: TIYEQF.

ГЕОФИЗИКА

Научная статья

УДК 550.3

Структурное картирование и определение перспективных залежей месторождения углеводородов Отио в дельте реки Нигер

М.А. Мохаммед^a

^a*Иркутский национальный исследовательский технический университет, Иркутск, Россия*

Резюме. Целью данного исследования являлось детальное структурное картирование и определение перспектив нефтеносного месторождения Отио, расположенного в дельте реки Нигер. В ходе работы использовались 3D-данные сейсморазведки и каротажные диаграммы для выделения подповерхностных структур и оценки углеводородного потенциала месторождения. Пять ключевых горизонтов были оценены с помощью петрофизического анализа, выявившего значения пористости в диапазоне от 18 до 27 %, уровни водонасыщенности от 20 до 31 % и отно-

© Mohammed A.M., 2025



шение мощности нефтенасыщенного пласта к его эффективной мощности от 59 до 96 %. Для каждого горизонта были построены структурные карты зависимости времени от глубины, что позволило выделить два перспективных участка – Северо-Восточный и Юго-Восточный. Северо-Восточный перспективный участок был оценен выше из-за большего предполагаемого объема углеводородов, а участок Sand E2 был определен как наиболее перспективный резервуар на основе объемного анализа. Данное исследование подчеркивает важность интеграции сейсмических и петрофизических данных для эффективной разведки и разработки месторождений, так как обеспечивает основу для принятия будущих решений по бурению на месторождении Отио. Исследование началось с оценки недр нефтеносного месторождения Отио, интегрирующей данные каротажа скважин и сейсмические данные, охватывающие месторождение. Для проекта использовались трехмерный сейсмический куб, базовая карта, данные по шести скважинам в формате LiDAR Aerial Survey и данные сейсмокаротажа (по одной скважине). Результаты показали, что выявленными углеводородоносными зонами являются пески D, E1, E2, H и J (по данным гамма-каротажа и резистивного каротажа). Корреляция песков по месторождению показала равномерное их развитие от скважины к скважине. Сейсмокаротаж был оценен положительно из-за отсутствия выбросов или ложных значений. Годограф представляет собой пологий наклон, который в конечном итоге становится круче из-за уплотнения нижележащих слоев, что приводит к уменьшению полного времени пробега. В результате структурной интерпретации на месторождении было выявлено шестнадцать разломов (F1–F16), как показало на сейсмическом разрезе. Разломы на месторождении простираются в направлении с востока на запад, причем большинство из них характеризуются падением пласта к северу, за исключением разломов F4 F6, F7 и F9, падающих на юг. Трехмерный структурный анализ месторождения Отио в дельте реки Нигер позволил лучше понять его тектоническую структуру и углеводородные ловушки. Было выявлено восемь коллекторов, пять нефтегазоносных песков (D, E1, E2, H, J), состоящих из песков, запечатанных сланцами, были нанесены на карту.

Ключевые слова: дельта реки Нигер, структурное картирование, интерпретация данных сейсмической разведки, петрофизический анализ, перспективы месторождения углеводородов, месторождение Отио

Благодарности: Автор выражает благодарность своему директору А.В. Паршину, коллегам и сотрудникам Института «Сибирская школа геонаук» Иркутского национального исследовательского технического университета (г. Иркутск, Россия), кафедры геологии и горного дела Университета Абуджи (г. Абуджа, Нигерия) и исследовательской группе в составе И.Ч. Офия, С.Л. Мохаммед, М.Г. Мохаммед и ее группе, а также А.М. Абубакару за их всестороннюю поддержку и помощь во время и после проведения данного исследования.

Для цитирования: Мохаммед М.А. Структурное картирование и определение перспективных залежей месторождения углеводородов Отио в дельте реки Нигер // Науки о Земле и недропользование. 2025. Т. 48. № 2. С. 185–203. <https://doi.org/10.21285/2686-9993-2025-48-2-185-203>. EDN: TIYEQF.

Introduction

Hydrocarbon reservoirs are found in geologic traps, that is, any combination of rock structure that will keep oil and gas from escaping vertically or laterally [1]. Most known traps in Niger Delta fields are structural although stratigraphic traps are not uncommon¹. The goal of oil and gas exploitation is to identify and delineate these traps suitable for profitably exploitable accumulations and delineate the extent of discoveries in field appraisals and development [2]. In this study, three Dimensional (3D) seismic data were integrated with well logs to delineate geologic structures and prospects in “Otio Field” onshore Niger Delta. Majority of traps in the Niger Delta are structural [1]. Examples of these structural traps are rollover anticlines, flanks of shale domes and traps related to faulting. Identification and proper classification of these traps as prospects form the basis of further exploration and economic decisions. Otio Field is located onshore Niger Delta

Field (Fig. 1). Due to proprietary reasons and confidentiality agreement with the data, exact location of the field cannot be provided.

The Niger Delta has an aerial extent of 75,000 km² (28,957 mi²) and is located between longitude 3° and 9° E, latitude 4° 30' and 5° 20' N (Fig. 2) [3]. The northern boundary is the Benin Flank (see Fig. 2) – a northeast trending hinge line south of the West Africa Basement Massif. The north-eastern boundary is defined by outcrops of the Cretaceous on the Abakaliki High and further southeast by the Calabar Flank (see Fig. 2) – a hinge line bordering the adjacent Precambrian. The offshore boundary of the province is defined by the Cameroon volcanic line to the east, the eastern boundary of the Dahomey Basin (the eastern-most West African transform-fault passive margin) to the west. During the Tertiary it built out into the Atlantic Ocean at the mouth of the Niger-Benue river system, an area of catchment that encompasses more than a mil-

¹ Tuttle M.L.W., Charpentier R.R., Brownfield M.E. The Niger Delta petroleum system: Niger Delta Province, Nigeria, Cameroon, and Equatorial Guinea, Africa: U.S. Geological Survey Open-File Report 99-50-H // USGS Science for a changing world. 1999. Available from: <https://pubs.usgs.gov/of/1999/ofr-99-0050/OF99-50H/OF99-50H.pdf> [Accessed 12th March 2025].

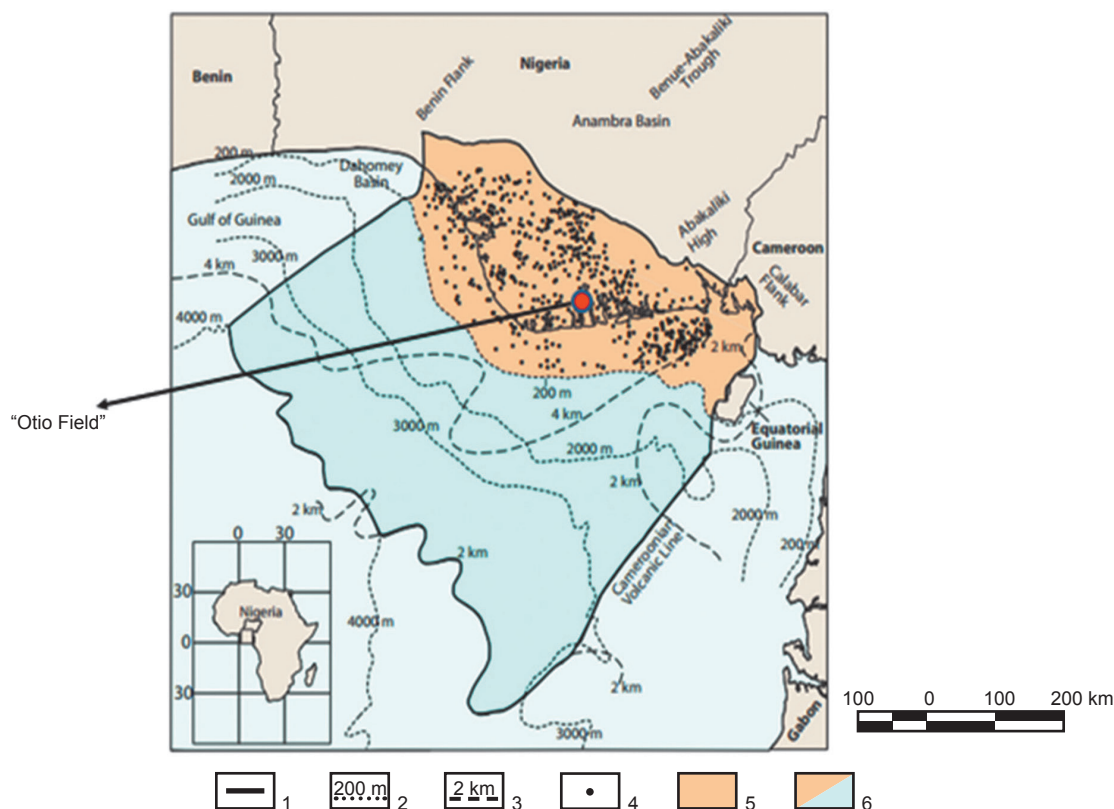


Fig. 1. Location of Otio field location onshore Niger Delta¹:

1 – province 7192 boundary; 2 – bathymetric contour, m; 3 – sediment thickness, km; 4 – center of gas or oil field;
5 – minimum petroleum system; 6 – maximum petroleum system

Рис. 1. Расположение месторождения Отио на побережье дельты реки Нигер¹:

1 – граница провинции 7192; 2 – батиметрический контур, м; 3 – мощность отложений, км;
4 – центр газового или нефтяного месторождения;
5 – минимальная нефтегазоносная система; 6 – максимальная нефтегазоносная система

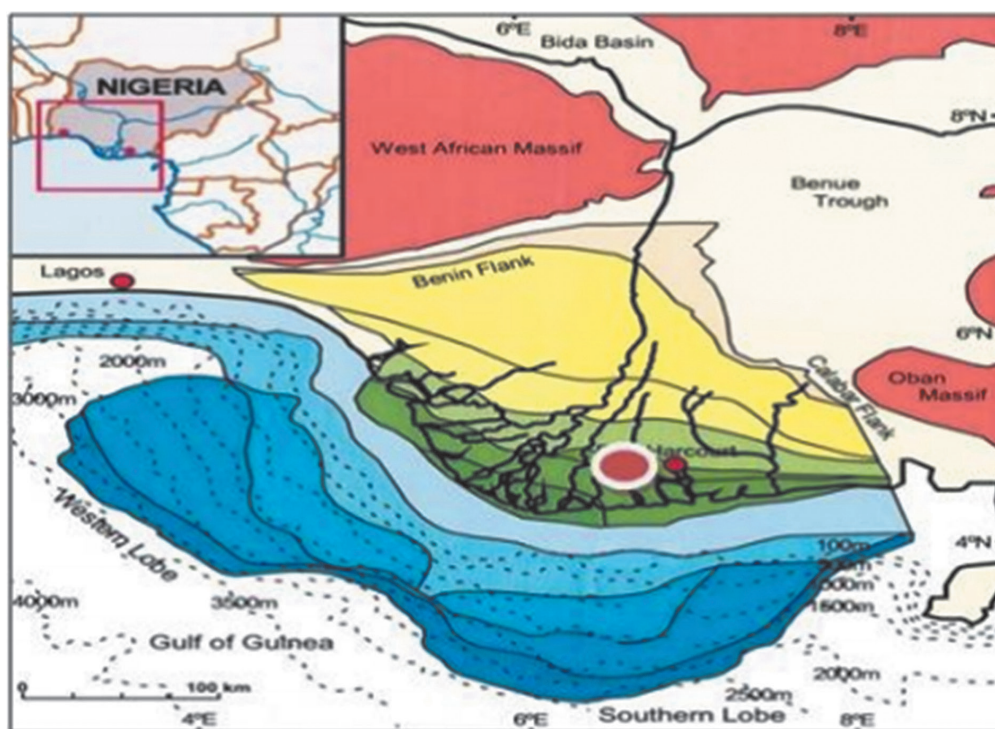


Fig. 2. Location of the Niger Delta [7]

Рис. 2. Расположение дельты реки Нигер [7]



lion square Kilometres of predominantly savannah covered lowlands [4]. The Cenozoic Niger Delta is situated at the intersection of the Benue Trough and the South Atlantic Ocean where a triple junction developed during the separation of the continents of South America and Africa in the late Jurassic². The two arms that followed the southwestern and southeastern coast of Nigeria and Cameroon developed into the passive continental margin of West Africa, whereas the failed arm formed the Benue Trough. Other depocenters along the African Atlantic coast also contributed to deltaic build-ups [5]. After an early history of rift filling in the late Mesozoic, the clastic wedge steadily prograded into the Gulf of Guinea during the Tertiary as drainage expanded into the African Craton with consequent subsidence of the passive margin [6].

Syn-rift sediments accumulated during the Cretaceous to Tertiary, with the oldest dated sediments of Albian age. Thickest successions of syn-rift marine and marginal marine clastics and carbonates were deposited in a series of transgressive and regressive phases [8]. The Syn-rift phase ended with basin inversion in the Santonian (Late Cretaceous). Renewed subsidence occurred as the continents separated and the sea transgressed the Benue Trough. The Niger Delta clastic wedge continued to prograde during Middle Cretaceous time into a depocenter located above the collapsed continental margin at the site of the triple junction. Sediment supply was mainly along drainage systems that followed two failed rift arms, the Benue and Bida Basins. Sediment progradation was interrupted by episodic transgressions during Late Cretaceous time.

During the Tertiary, sediment supply was mainly from the north and east through the Niger, Benue and Cross Rivers. Cross River and Benue River provided substantial amounts of volcanic detritus from the Cameroon volcanic zone beginning in the Miocene. The Niger Delta clastic wedge prograded into the Gulf of Guinea at a steadily increasing rate in response to the evolution of these drainage areas and continued basement subsidence. Regression rates increased in the Eocene, with an increasing volume of sediments accumulated since the Oligocene [4]. Delta progradation occurred along two major axes, the first paralleled the Niger River, where sediment supply exceeded subsidence rate. The Second, smaller than the first, became active during

Eocene to early Oligocene basinward of the Cross River where shorelines advanced into the Olumbe-1 area [9]. This axis of deposition was separated from the main Niger Delta deposits by the Ihuo Embayment, which was later rapidly filled by advancing deposits of the Cross River and other local rivers [9]. Late stages of deposition began in the early to middle Miocene, as these separate eastern and western depocenters merged. In Late Miocene the delta prograded far enough that shorelines became broadly concave into the basin. Accelerated loading by this rapid delta progradation mobilized underlying unstable shales. These shales rose into diapiric walls and swells, deforming overlying strata. The resulting complex deformation structures caused local uplift, which resulted in major erosion events into the leading progradational edge of the Niger Delta. Several deep canyons, now clay filled, cut into the shelf and are commonly interpreted to have formed during sea level lowstands. The best known are the Afam, Opuama, and Qua Iboe Canyon fills.

Three major depositional cycles have been identified within Tertiary Niger Delta deposits [9, 4]. The first two, involving mainly marine deposition, began with a middle Cretaceous marine incursion and ended in a major Paleocene marine transgression. The second of these two cycles, starting in late Paleocene to Eocene time, reflects the progradation of a "true" delta, with an arcuate, wave- and tide-dominated coastline. These sediments range in age from Eocene in the north to Quaternary in the south [4]. Deposits of the last depositional cycle have been divided into a series of six depobelts separated by major syn-sedimentary fault zones [4]. These depobelts formed when paths of sediment supply were restricted by patterns of structural deformation, focusing sediment accumulation into restricted areas on the delta. Such depobelts changed position over time as local accommodation was filled and the locus of deposition shifted basinward (Fig. 3) [4].

Normal faults triggered by the movement of deep-seated, overpressured, ductile, marine shale have deformed much of the Niger Delta clastic wedge [8]. Many of these faults formed during delta progradation and were syn-depositional, affecting sediment dispersal. Fault growth was also accompanied by slope instability along the continental margin. Faults flatten with depth, known as growth faults, onto a master detachment plane near the top of the overpressured

² Obaje N.G. Geology and mineral resources of Nigeria. Berlin: Springer, 2009. 221 p.

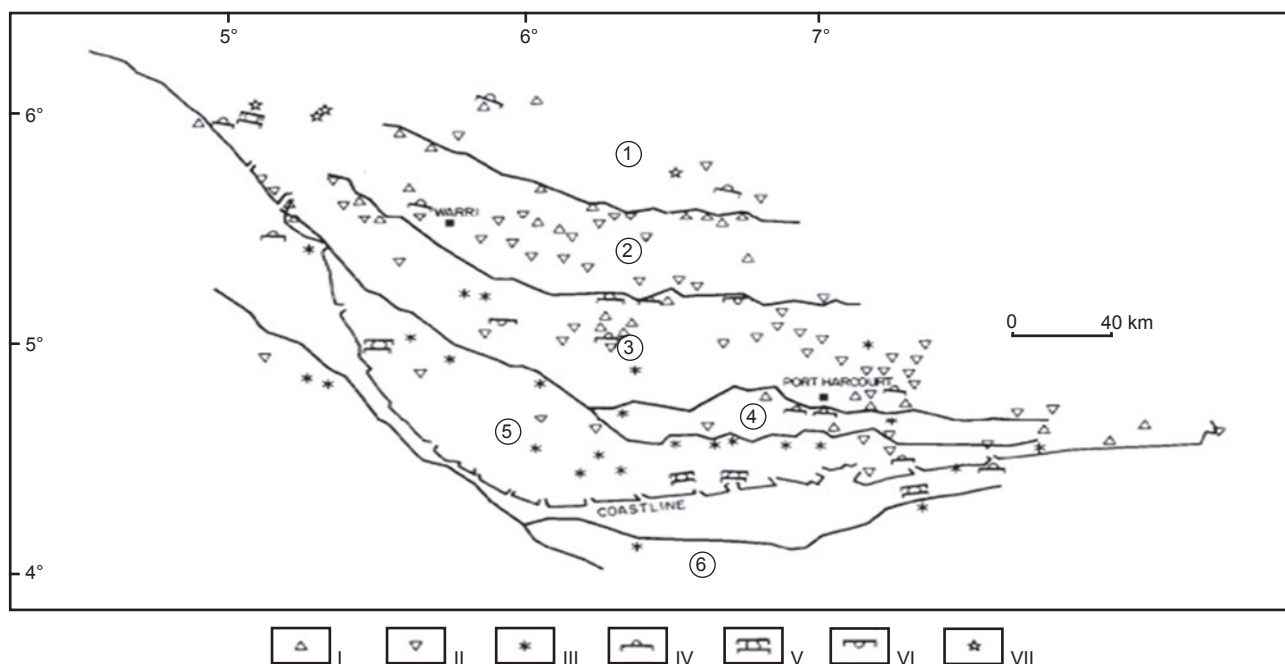


Fig. 3. Structural types of the Niger delta and associated depobelt [4]:

1 – northern delta; 2 – Greater Ughelli; 3 – central swamp 1; 4 – central swamp 2; 5 – coastal swamp; 6 – offshore
 I – anticline; II – faulted anticline; III – collapsed crest; IV – footwall closure; V – k-type footwall closure;
 VI – hanging-wall closure; VII – stratigraphic component

Рис. 3. Структурные типы дельты реки Нигер и связанного с ней пояса залежей [4]:

1 – северная дельта; 2 – Большой Угелли; 3 – центральная заболоченная территория 1; 4 – центральная заболоченная территория 2; 5 – прибрежная заболоченная территория; 6 – шельф
 I – антиклиналь; II – нарушенная антиклиналь; III – обрушившийся гребень; IV – замкнутая структура подошвы; V – тип k замкнутой структуры подошвы; VI – структура висячего крыла сброса;
 VII – стратиграфический компонент

marine shales at the base of the Niger Delta succession. Structural complexity in local areas reflects the density and style of faulting. Simple structures, such as flank and crestal folds, occur along individual faults. Hanging-wall rollover anticlines developed because of listric-fault geometry and differential loading of deltaic sediments above ductile shales. Growth faults and associated anticlinal closures form the primary traps for oil and gas, with major fields often located along faulted rollover structures (Fig. 4) [10]. More complex structures, cut by swarms of faults with varying amounts of throw, include collapsed crest features with domal shape and strongly antithetic (opposing) fault dips at depth. The interaction between extensional and compressional regimes is particularly evident at the delta's toe, where compressional folds and thrust faults develop in response to gravitational sliding on the continental slope [11].

The thick wedge of the Niger Delta sediments can be considered to consist of three stratigraphic units (Table 1) [9]. The basal unit primarily composed of marine shales [12] is called the Akata Formation with Imo Shale as its sur-

face equivalent. During the Paleocene and earliest Eocene times, marine shales were deposited (Fig. 5) [13]. This unit also comprises some sand beds, which are thought to be continental slope channel fills and turbidites. The Akata Formation ranges in thickness from 600 to probably over 6000 meters. The overlying paralic sequence, forming the Agbada Formation consists of interbedded sands and shales with a thickness of 300 up to about 4500 meters. The Agbada Formation consists of alternating sandstones and shales deposited at the interface between the lower deltaic plain and the marine sediments of the continental shelf fronting the delta [12]. The Agbada Formation is built up of numerous offlaps cycles of which the sandy parts constitute the main hydrocarbon reservoirs and the shales the caprock, the topmost unit. The Benin Formation is composed of fluvial gravels and sands. The sandstone is coarse grained, commonly very granular and pebbly to very fine grained with few shale intercalations [9]. This unit has a maximum thickness of about 2100 m [14] where there is maximum subsidence of the basement. Advanced seismic imaging

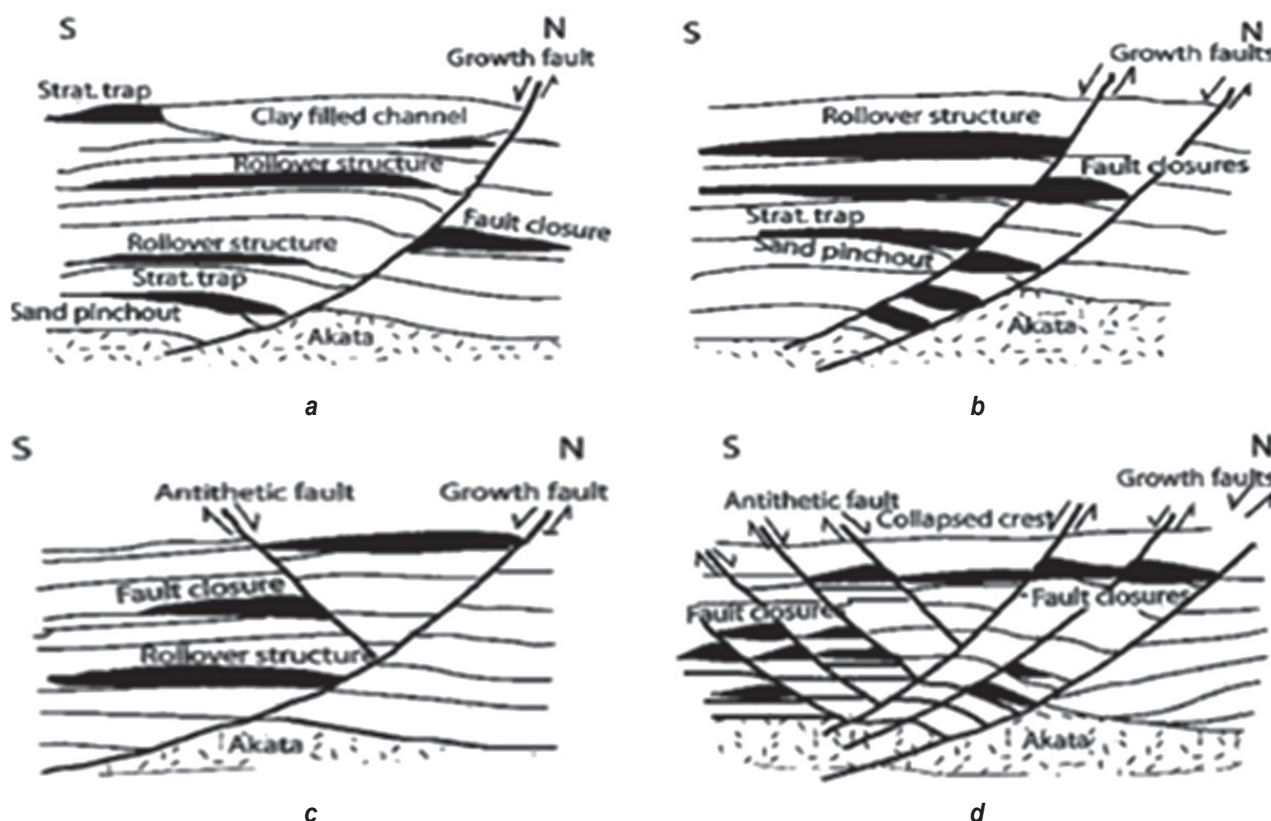


Fig. 4. Typical Niger delta structures [4]:

a – simple rollover; b – growth faults; c – antithetic fault; d – collapsed crest

Рис. 4. Типичные структуры дельты реки Нигер [4]:

а – простой сброс; б – разломы роста; с – антитетический сброс; д – обрушившийся гребень

and structural modeling have become essential tools for mapping these complex features, enabling better prediction of reservoir distribution and trap integrity [15].

In the building of the Akata Formation, rapid sand deposition along the delta edge on top of the undercompacted clay has resulted in the development of large number of syn-sedimen-

Table 1. Showing formations of Niger Delta area, Nigeria (adapted from [9])

Таблица 1. Формации района дельты реки Нигер (Нигерия) (согласно источнику [9])

Subsurface			Surface outcrops		
Youngest known age	–	Oldest known age	Youngest known age	–	Oldest known age
Recent	Benin formation (Afam shale member)	Oligocene	Plio/ Pleistocene	Benin formation	Miocene
Recent	Agbada formation	Eocene	Miocene	Ogwashi-Asaba formation	Oligocene
			Eocene	Ameki formation	Eocene
Recent	Akata formation	Eocene	L. Eocene	Imo Shale formation	Paleocene
			Paleocene	Nsukka formation	Maestrichtian
			Maestrichtian	Ajali formation	Maestrichtian
			Campanian	Mamu formation	Campanian
Equivalents not known			Camp/Maest	Nkporo shale	Santonian
			Coniacian/ Santonian	Awgu shale	Turonian
			Turonian	Eze aku shale	Turonian
			Albian	Asu river group	Albian

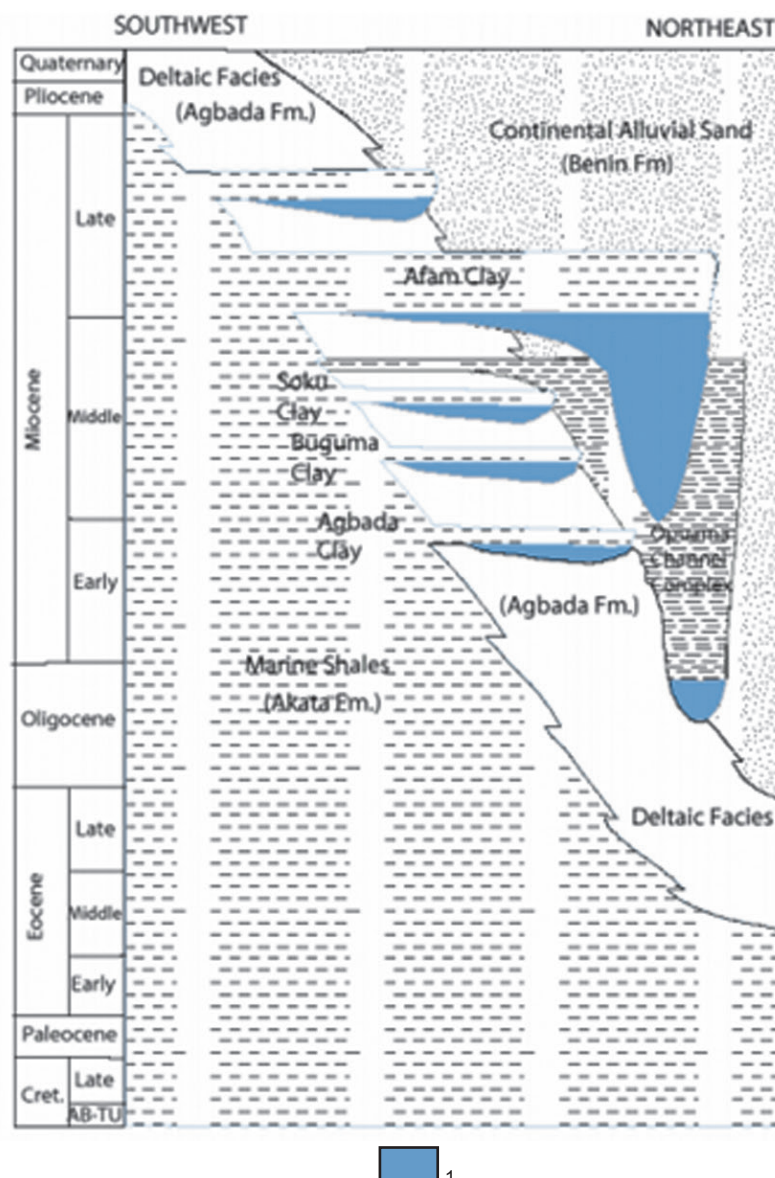


Fig. 5. Schematic representation of the diachronous nature of major lithofacies units, and the stratigraphic relationships of clay filled channels on the delta flanks [4]:

1 – extent of erosional truncation

Рис. 5. Схематическое изображение диахронной природы основных литофаций и стратиграфических взаимоотношений заполненных глиной каналов на склонах дельты [4]:

1 – степень эрозионного среза

tary gravitational faults. These so-called “growth faults” are also well known from the US Gulf coast. The spacing between successive growth fault decreases with an increase in the rate of depositional slope or an increase in the rate of deposition over the rate of subsidence.

The main control on the depositional system in the Niger Delta Clastic wedge is enforced by the continental margin collapse structures. These structures extends laterally along depositional strike across nearly the entire Niger Delta group up to hundreds of Kilometres and are thus defined as mega structures [13], and the associated de-

pobelts which are perpendicular to the shorelines, ranging tens of Kilometres [4]. From early Miocene to present, six depobelts have been deposited, namely; Northern delta, Ughelli, Central, Coastal 1, Coastal 2 and Offshore. The depobelt tend to be fine grained laterally away from areas of most deltas progradation and basinward away from most rapid growth faults developments [4]. They are defined by syn-sedimentary faulting formed as a result of variable rate of subsidence and supply and correspond to break in regional dip of the delta, bounded landward by growth faults and seaward by large counter-regional faults (Fig. 6) [13, 4].

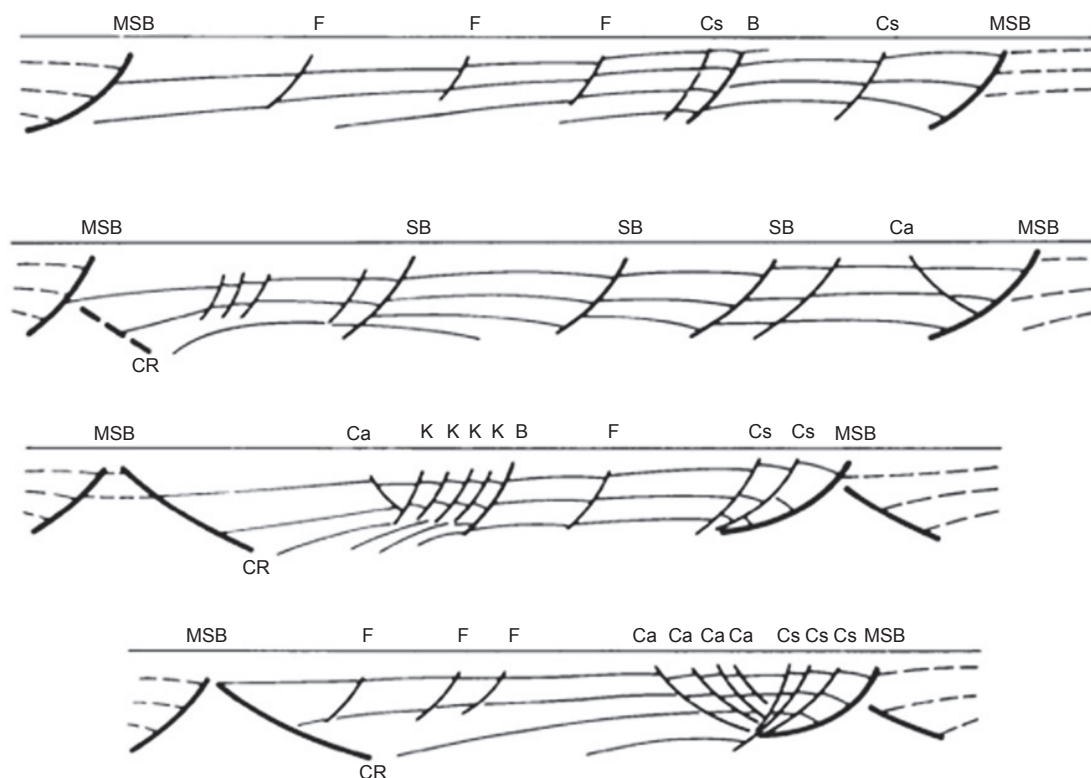


Fig. 6. Syn-sedimentary structures of the Niger delta [13]:

MSB – major structure – building fault separating megaunits; SB – structure – building fault separating macrounits; Cs – crestal fault (synthetic); Ca – crestal fault (antithetic); F – flank faults; K – closely spaced flank faults typified by offshore K block; CR – counter-regional fault

Рис. 6. Синседиментационные структуры дельты реки Нигер [13]:

MSB – основная структура – строительный разлом, разделяющий мегаединицы; SB – структура – строительный разлом, разделяющий макроединицы; Cs – гребневой разлом (синтетический); Ca – гребневый разлом (антитетический); F – фланговые разломы; K – близко расположенные фланговые разломы, типичные для шельфового блока K; CR – секущий разлом

These syn-sedimentary structures include simple non faulted anticline roll over structures, faulted roll over anticline with multiple growth faults, complicated collapse crest structures, sub-parallel growth fault and structural closures along back of major faults [13, 6]. Small scale faults and associated structural deformation tends to be more complex near the progradation axis of the delta than at its margin. Armentrout et al. [16] and Hooper et al. [17] stated that this pattern of deposition with extensional development of growth faults on the modern shelf and slope, and compressional uplift near the toe of the slope of the Niger delta still continues today. As sediment supply filled available accommodation space, new depobelts formed seaward, separated by major fault zones that accommodated differential subsidence [18].

Materials and methods

The principal databases used for this project are three Dimensional (3D) seismic cube,

base map (see Fig. 1), six well data (Table 2) in LAS format and check shot data for only one well, Otio-2, that was shared for the rest of the wells in the Field. The 3D seismic data is a high-resolution Post-Stack Time Migration (PSTM) in SEG-Y format. The base map covers an approximate area of 55 square kilometres with Inlines range of 5800–6200 and Crosslines range of 1480–1700. The six wells used for the project are named Otio-1, Otio-2, Otio-3ST, Otio-4, Otio-5 and Otio-6. Otio-3ST and Otio-6 are deviated wells and their deviation data were available. They wells were drilled to depth of 13020 ft, 11669.10 ft, 12090 ft, 11440 ft, 11700 ft, and 13310 ft respectively. The main software packages used for this project are the Openwork Suites with applications such as Siesworks and Zmap used for structural, stratigraphic interpretation and map generation. Powerlog software was used for well correlation and petrophysical analysis.



Table 2. Showing available wells and logs
Таблица 2. Отображение доступных скважин и каротажей

Log data	Otio-1	Otio-2	Otio-3ST	Otio-4	Otio-5	Otio-6
Gamma ray	✓	✓	✓	✓	✓	✓
Resistivity	✓	✓	✓	✓	✓	✓
Neutron	X	✓	X	✓	✓	✓
Density	X	X	X	✓	✓	✓
Sonic	X	✓	X	✓	✓	X
Caliper	✓	X	✓	✓	✓	✓
Checkshot	✓	X	X	X	X	X

Note. ✓ – available; X – unavailable.

The project reported here started off with the subsurface evaluation of the “Otio Field” integrating well log data from the Field and seismic data spanning the field. The following method and workflow were adopted for the evaluation phase (Fig. 7):

- loading of well log data and seismic data;
- QA/QC of loaded data;
- hydrocarbon bearing zones identification;
- sand to sand well log correlation;
- petrophysical analysis;
- integration of correlation with seismic data (well-to-seismic tie);

- structural and stratigraphic interpretation;
- time and depth map generation;
- volumetric estimation.

The seismic data was loaded into Openwork software, while the log data were loaded into the Powerlog software. Benin base of Niger Delta was first established using the first thick shale as marker corresponding to the first major drop in resistivity interpreted as the change from the Benin fresh water to salt water of Agbada were loop tied to assure consistency across the wells.

Geological interpretation was done every 5th Inline and Crossline. Arbitrary lines were taken

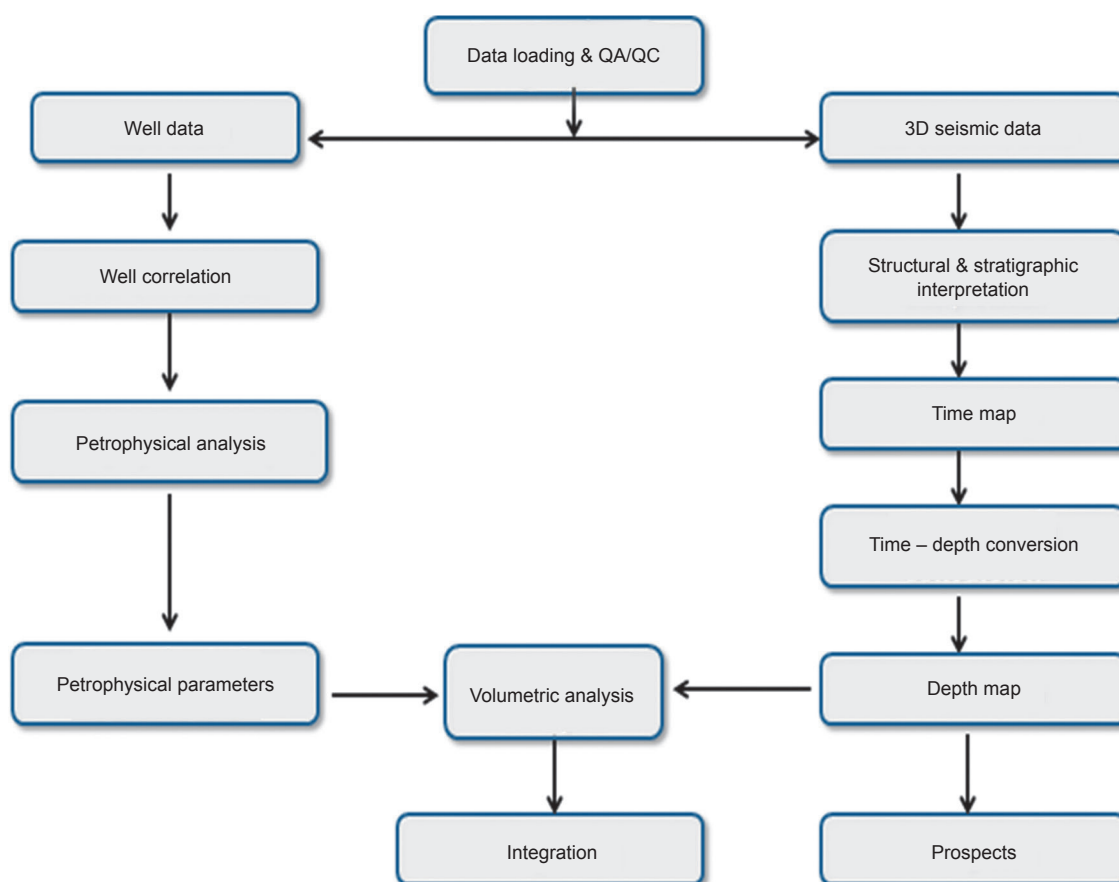


Fig. 7. Workflow for evaluation phase
Рис. 7. Последовательность рабочего процесса на этапе оценки



where necessary to overcome interpretation challenges such as interpretation across fault planes. The faults as seen on the seismic In-line section were interpreted using consistent abrupt terminations of reflection across Inlines first. This is necessary to fully understand the structural style and setting of the Field. The consistency of the faults was viewed in Coherence time display (Fig. 8). The faults were interpreted as normal faults showing varying degree of throw as would be expected in onshore Niger Delta. The faults were mapped based on the following criteria:

- abrupt termination and discontinuity of events across fault planes;
- vertical displacement of reflections;
- change in pattern of events across fault planes.

After mapping the faults, the fault heaves were traced out on the basemap to establish the

fault polygons (Fig. 9). Posting the faults on the basemap also helped in identifying and correlating the faults on the seismic sections (Fig. 10). The heaves were observed to be directly related to the throw of the faults. The dip direction was indicated.

There are six steps involved seismic horizon interpretation adopted in this project:

- horizon picking;
- timing;
- time maps generation;
- time-depth conversion;
- contour;
- depth maps generation.

Horizon picking: A horizon is a mappable reflection representing a geologic event on a seismic section. It is the interface between two different rock layers with different density and velocity (Fig. 11). Five horizons were picked which marked the tops of five hydrocarbon bearing sands:

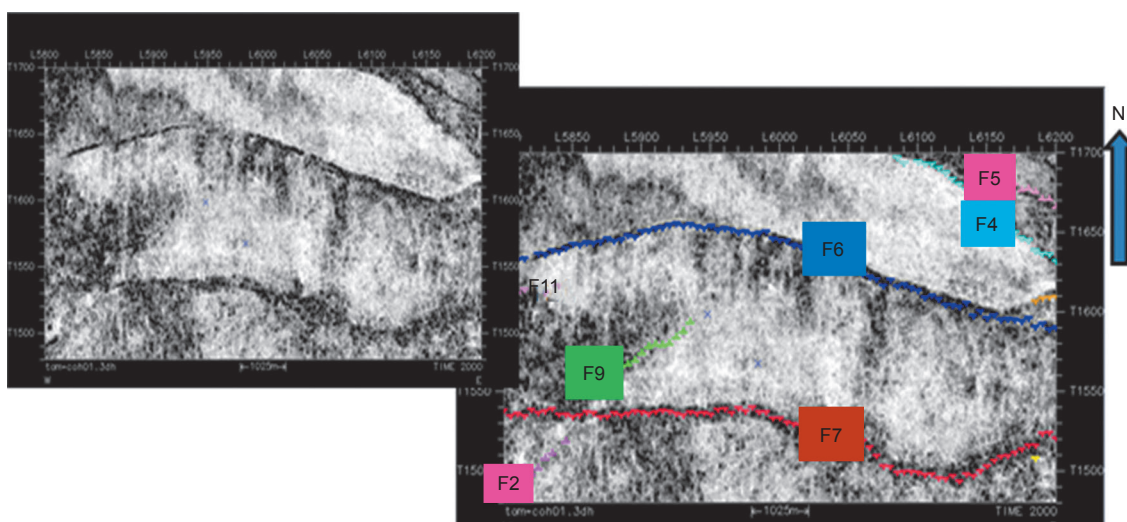


Fig. 8. Coherence time slice showing interpreted fault trend (Openworks, 2011)

Рис. 8. Временной срез когерентности, показывающий интерпретированную тенденцию разлома (Openworks, 2011)

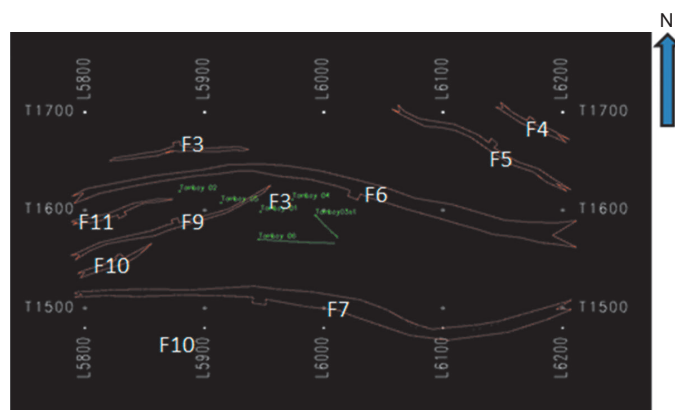


Fig. 9. Interpreted faults polygons on base map (Openworks, 2011)

Рис. 9. Интерпретированные полигоны разломов на базовой карте (Openworks, 2011)

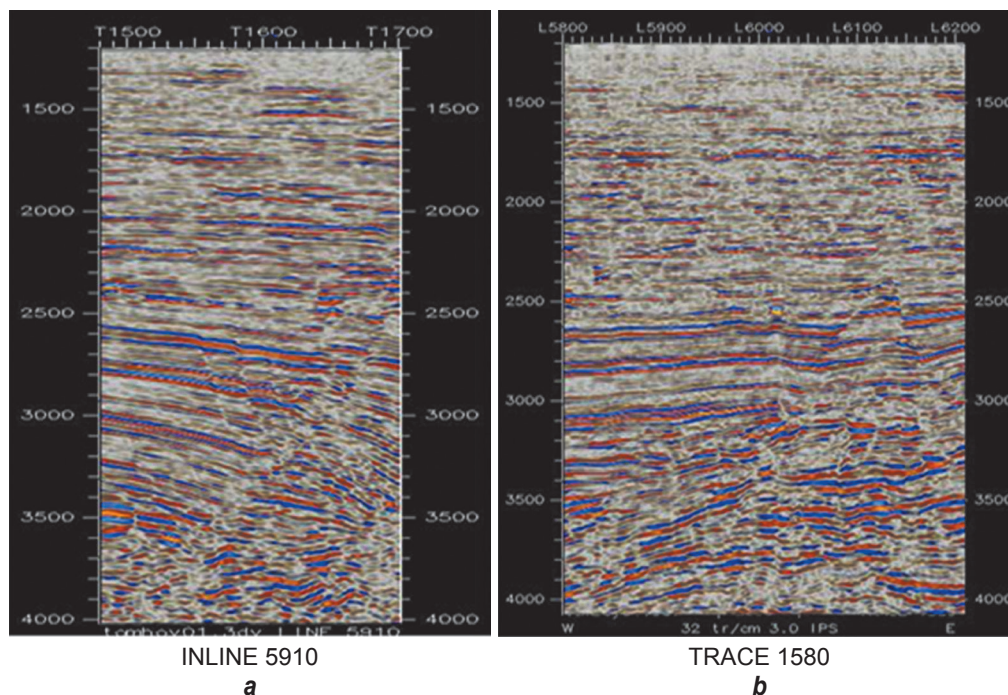


Fig. 10. Post-stack time migration seismic section along inline 5910 (a) and crossline 1580 (b) (Openworks, 2011)

Рис. 10. Сейсмический разрез миграции во временной области после суммирования вдоль линии 5910 (a) и поперечной линии 1580 (b) (Openworks, 2011)

Sand D, Sand E1, Sand E2, Sand H and Sand J. The horizons were picked using the time equivalent of the sand tops on the wells displayed on seismic using check shot data. Checkshots were used to convert depth to two-way time (Fig. 12).

The events corresponding to these sand tops were mapped based on reflection continuity on Inlines and Crosslines honouring terminations due to fault planes already interpreted. Corresponding events were mapped across the faults using the “cor-

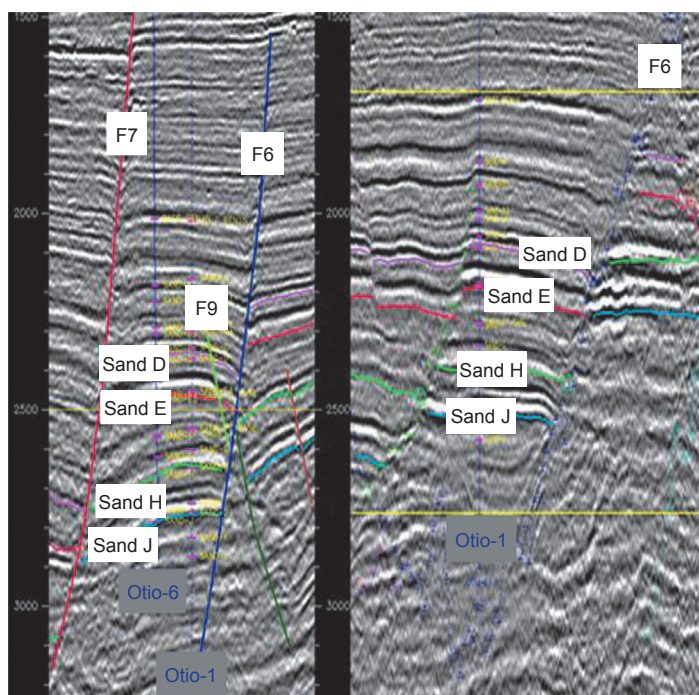


Fig. 11. Interpreted faults and identified horizons of interest on seismic Inline 5910 (Openworks, 2011)

Рис. 11. Интерпретированные изучаемые разломы и выявленные горизонты на сейсмической линии 5910 (Openworks, 2011)

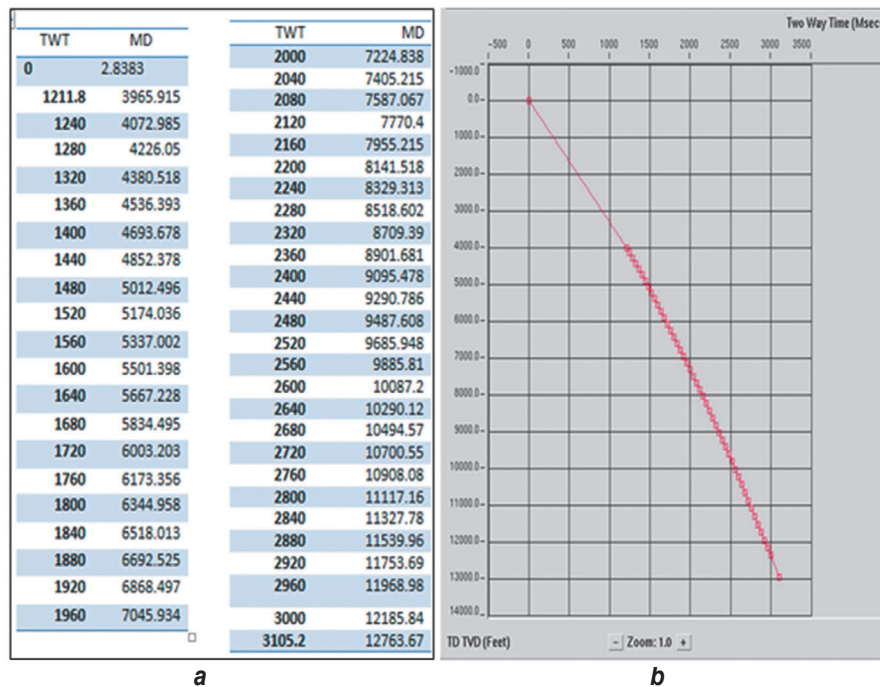


Fig. 12. Data (a) and plot (b) of the Otio-2 control image used to tie wells to seismic data (Powerlog, 2014)
Рис. 12. Данные (a) и график (b) контрольного снимка Отио-2, используемые для привязки скважин к сейсмическим данным (Powerlog, 2014)

relation polygon" and reflection count techniques identifying seismic facies in the seismic section.

The horizons were mapped round the whole seismic volume by looping and phantoming. The looped interpretation resulted in seeded maps. Seeded maps have interpreted data gaps that were filled by interpolating.

Results and discussions

Hydrocarbon bearing zones: the identified hydrocarbon bearing zones are Sands D, E1, E2, H and J as interpreted from GR and resistivity logs. These zones are shown in Figures 13–16. These zones are the units of interest for further evaluation.

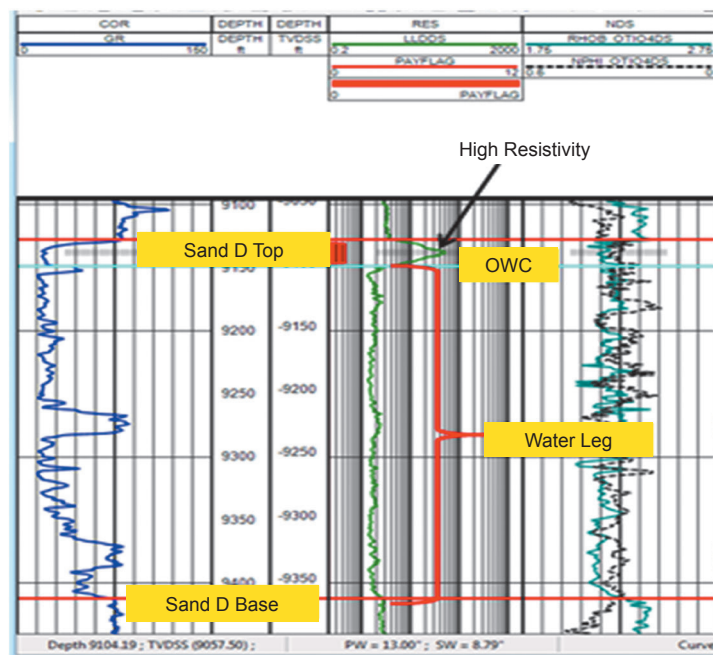


Fig. 13. Sands D in Otio-1 with high resistivity interpreted as hydrocarbon zone (Powerlog, 2014)
Рис. 13. Пески D в Отио-1 с высоким каротажом сопротивления, рассматриваемые как углеводородная зона (Powerlog, 2014)

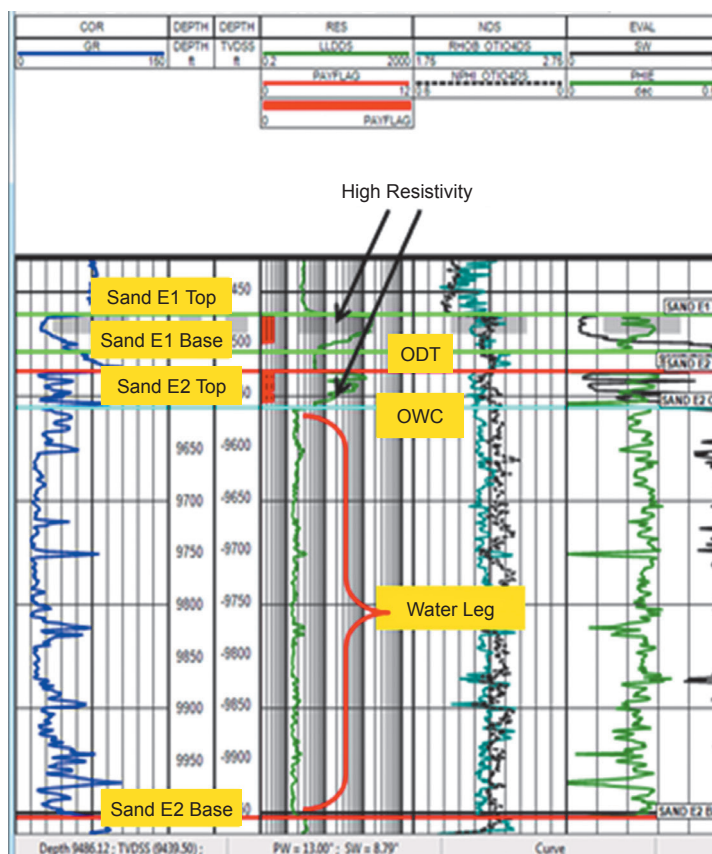


Fig. 14. Sands E1 and E2 in Oti-1 with high resistivity interpreted as hydrocarbon zones (Powerlog, 2014)

Рис. 14. Пески E1 и E2 в Отио-1 с высоким каротажом сопротивления, рассматриваемые как углеводородные зоны (Powerlog, 2014)

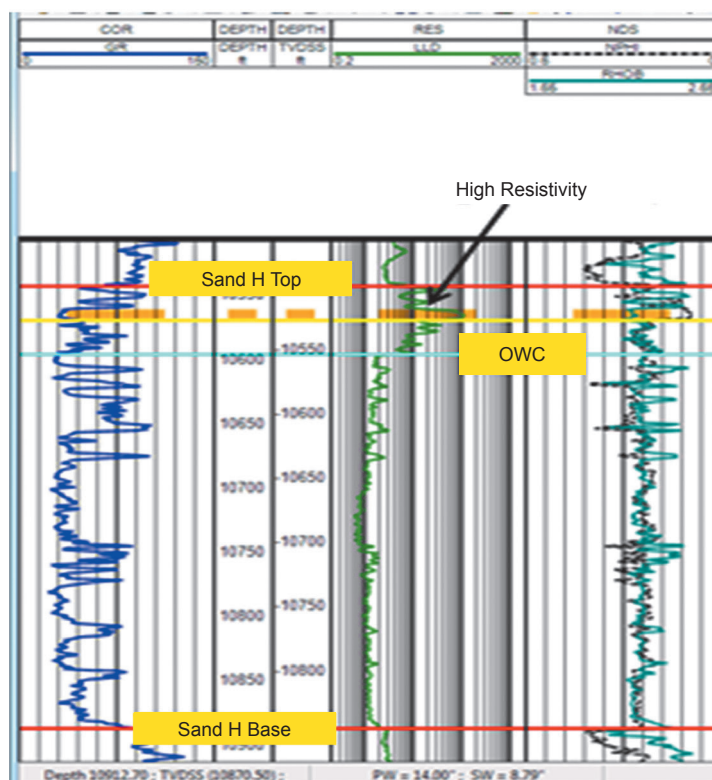


Fig. 15. Sand H in Oti-4 with high resistivity interpreted as hydrocarbon zones (Powerlog, 2014)

Рис. 15. Пески H в Отио-4 с высоким каротажом сопротивления, рассматриваемые как углеводородные зоны (Powerlog, 2014)

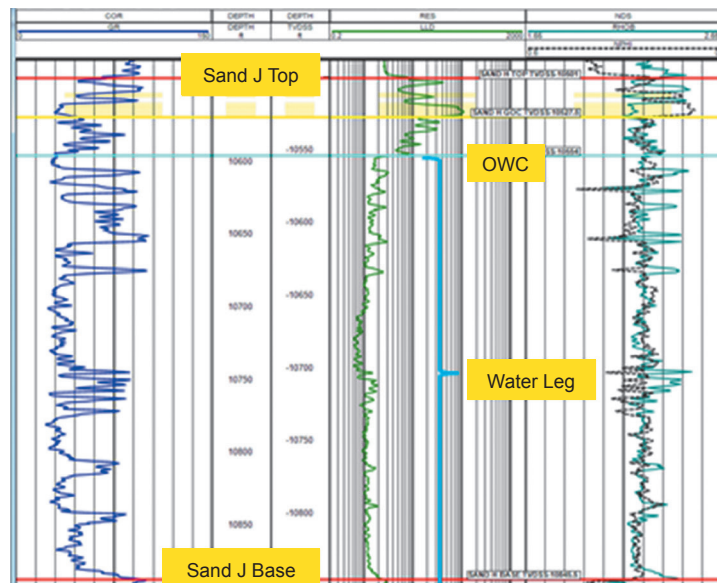


Fig. 16. Sands J in Otio-4 with high resistivity interpreted as hydrocarbon zones (Powerlog, 2014)

Рис. 16. Пески J в Отио-4 с высоким коротажем сопротивления, рассматриваемые как углеводородные зоны (Powerlog, 2014)

Sand to sand correlations: Sand correlation across the field showed uniform sand development from well to well (Fig. 17). Sand H appears missing in Otio-5 due to possible faulting. The sands vary from blocky, progradational and retrogradational depicting variation in environment of deposition. Sands E1 and E2 are separated by a thin shale unit capable of impeding communication between both reservoirs, which necessitated the units to be mapped independently. The correlation shows that the reservoirs is of good

continuity as the wells saw all of the reservoirs except sand Otio-5 that has a missing section because it crossed a fault.

Checkshot loading: The result of the third (3rd) order plot of the checkshot data is shown in (see Fig. 9). The checkshot is interpreted as good because of the absence of outliers or spurious values. The plot is a gentle slope that eventually steepens because of compaction of the underlying units that causes Two-Way Time to decrease. Otio-2 checkshot was shared for other wells

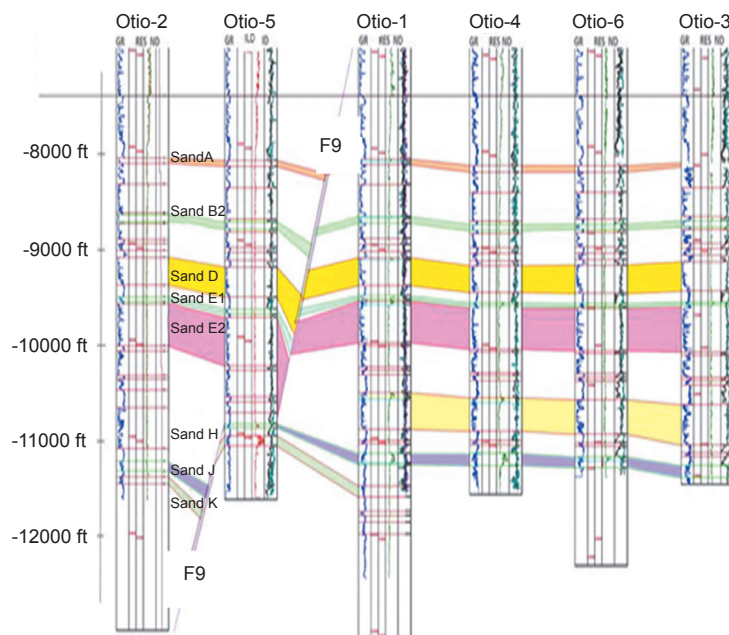


Fig. 17. Sand to sand correlation of the "Otio Field" (Powerlog, 2014)

Рис. 17. Взаимосвязь между песками месторождения Отио (Powerlog, 2014)



(Fig. 18) and a multipanel seismic section (Fig. 19) was taken across the wells to check the consistency of sand top picks across the seismic (see Fig. 10).

Structural Interpretation: Sixteen faults (F1-F16) were interpreted across the field as seen on seismic section. All the faults were interpreted as normal faults with fault F6 and F7 the major faults in the field listric in nature. Coherence Timeslices were used to guide in fault interpreta-

tion. Litho-units on the down-thrown block of the major faults appear to be thicker compared to the up-thrown block. F6 and F7 were therefore as listric growth faults which are syn-sedimentary evident in the Niger Delta. Faults in the field trend in the East-West direction with majority of them dipping north except for faults F4 F6, F7 and F9 dipping south. Rollover anticlinal structure (Fig. 20) is seen on the down-thrown block of fault F9.

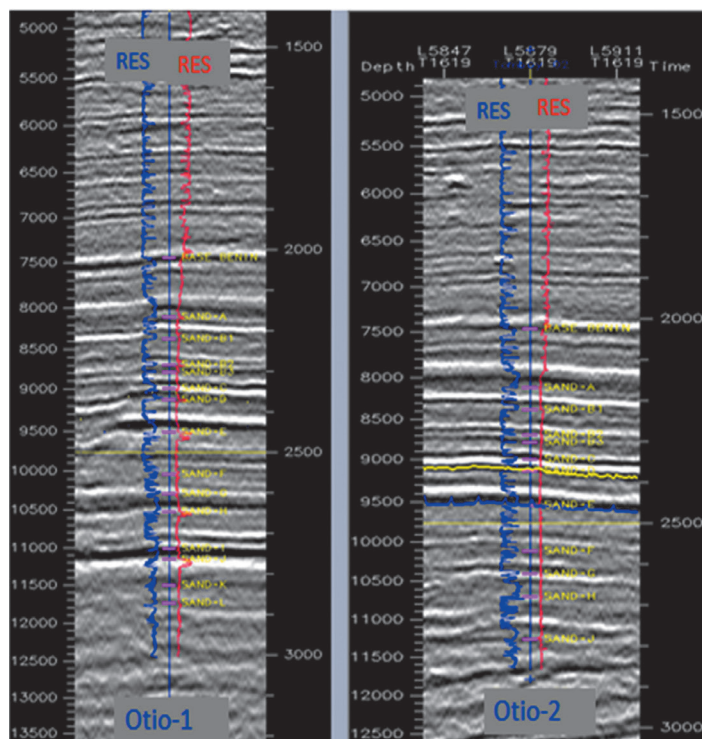


Fig. 18. Otio-1 and Otio-2 well section displayed on seismic section (Openworks, 2011)

Рис. 18. Разрез скважин Отио-1 и Отио-2, отображенный на сейсмическом разрезе (Openworks, 2011)

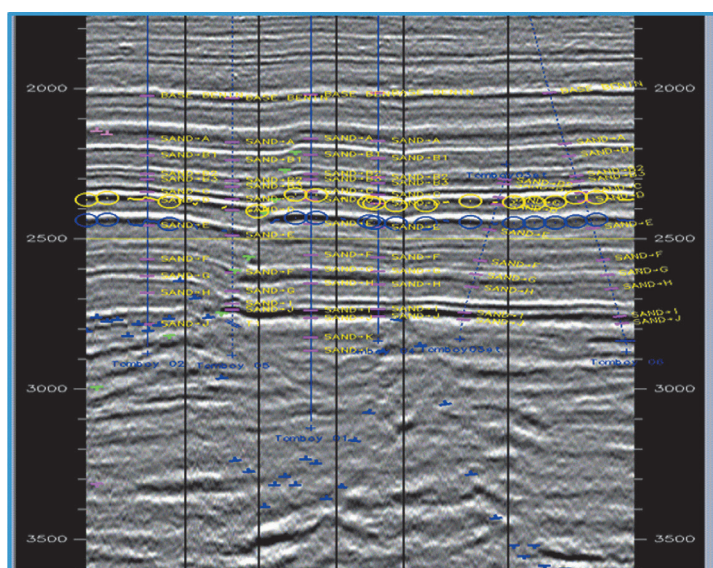


Fig. 19. Multipanel display of all well sections (Openworks, 2011)

Рис. 19. Многопанельное отображение всех разрезов скважин (Openworks, 2011)

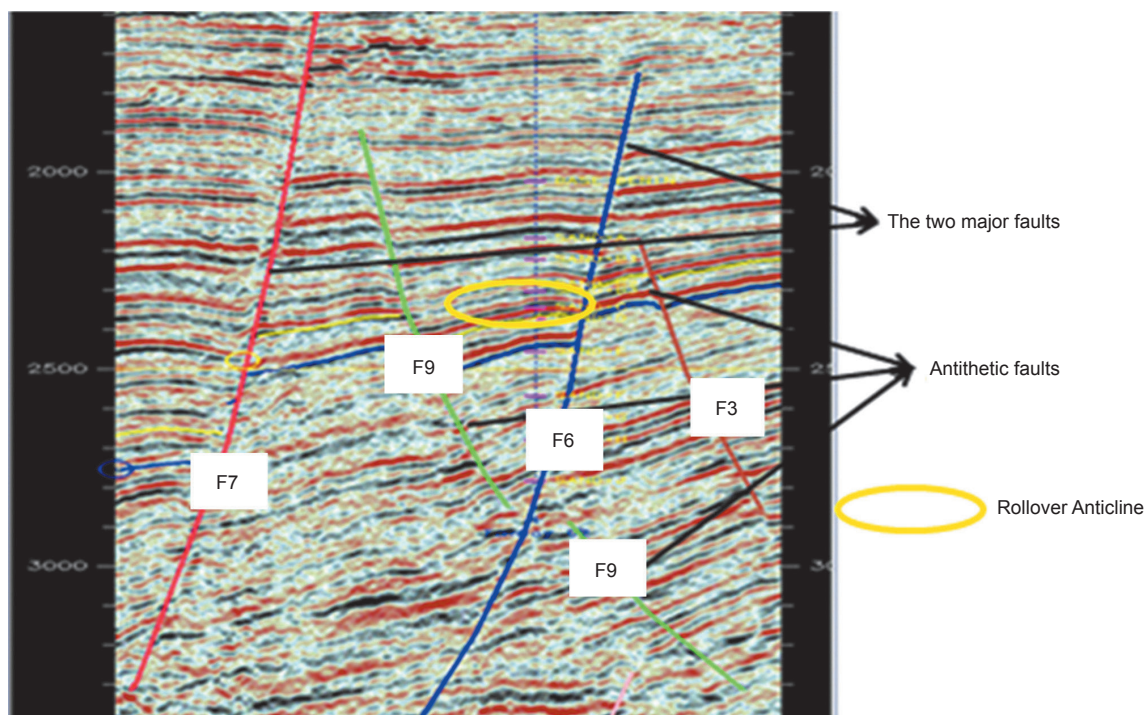


Fig. 20. Seismic section showing the two major faults in the “Otio Field” (Openworks, 2011)
Рис. 20. Сейсмический разрез, показывающий два основных разлома месторождения Отио (Openworks, 2011)

The structural styles as observed from depth structure map of Sand D (Fig. 21) top show rollover anticlines on fault F9 assisting in hydrocarbon accumulation. This was also observed at deeper levels on Sands E1 and E2 tops. On Sand H top structure map, fault F9 has grown bigger latching on fault F6. This new configuration makes accumulation totally dependent on faults F9 and F6 (see Fig. 20). Appearance of new faults (F15 and F16) is observed on Sand H top and disappearance of

fault F11 is noted. The same structural setting is observed on Sand J, however, there is the disappearance of fault F15 on the up-thrown block of fault F6 and the appearance of another small fault F14 which plays no role in hydrocarbon accumulation. From seismic section, Sand H appears missing due to obvious faulting which corroborates the missing unit in Otio-5 as seen in the well correlation panel. Otio-5 encounters pay zone in another fault block after crossing fault F9.

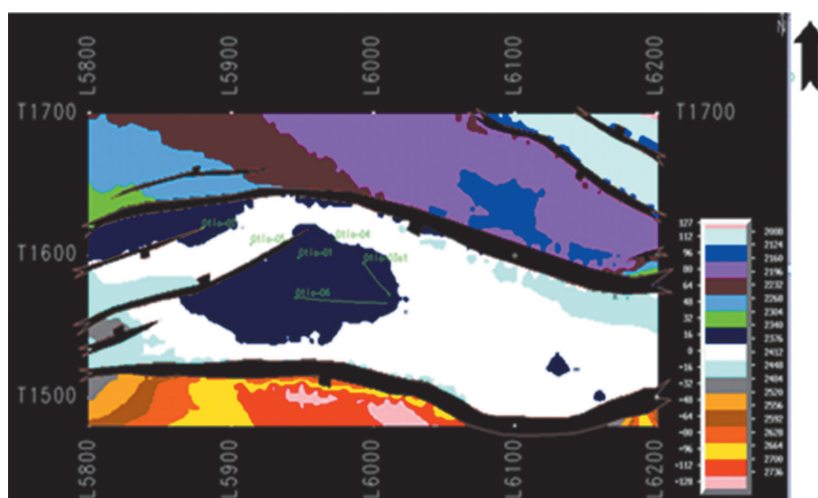


Fig. 21. Interpolated sand D on the base map (Openworks, 2011)
Рис. 21. Интерполированный песок D на базовой карте (Openworks, 2011)



Conclusion

The 3D structural analysis of Otio Field in the Niger Delta enhanced understanding of its structural styles and hydrocarbon traps. Eight reservoirs were identified, with five hydrocarbon-bearing sands (D, E1, E2, H, J) mapped, consisting of sands sealed by shales. Wells Otio-1, Otio-3ST, Otio-4, and Otio-6 hit pay zones, while Otio-2 was wet, and Otio-5 found pay deeper after crossing fault F9. Petrophysical analysis showed porosity of 18–27 %, water saturation of 20–31 %, and Net-To-Gross of 59–96 %. The field features moderate faulting with two major south-dipping, east-west trending growth faults (F6, F7) and a

fault-assisted closure (F9) down-thrown of F6, critical for deeper traps. Six wells targeted this closure, with Otio-1, the deepest, testing all reservoirs near the structure's crest. Anticlinal structures and fault-dependent closures are key trapping mechanisms. Volumetric analysis identified Sand E2 as the most prolific (24.72 MMBO) and Sand H the least (3.77 MMBO). Two prospects, North-Eastern (NE) and South-Eastern (SE), were defined, with NE being more economical (STOIIP 49.42 MMBO vs. 37.63 MMBO for SE). Integrating seismic and well log data was vital for mapping and prospect identification, guiding future exploration.

References

- Obiekezie T.N., Bassey E.E. 3D structural analysis of Otu Field, Niger Delta, Nigeria. *Physical Science International Journal*. 2015;7(2):114-126. <https://doi.org/10.9734/PSIJ/2015/16512>.
- Nyantakyi E.K., Hu W., Borkloe J.K. Integrated 3D seismic and petrophysical analysis for hydrocarbon exploration in the Niger Delta. *Petroleum Science and Technology*. 2013;31(15):1590-1600.
- Ophori D.U., Gorrington M., Olsen K., Orhua E., Hope J. A preliminary analysis of groundwater chemistry in shallow boreholes, Ughelli, Nigeria. *Journal of Environmental Hydrology*. 2007;15. Available from: <http://www.hydroweb.com/project/pubs/jeh/jeh2007/ophori.pdf> [Accessed 18th February 2025].
- Doust H., Omatsola E. Niger Delta. In: Edwards J.D., Santogrossi P.A. (eds). *Divergent/passive margin basins*. American Association of Petroleum Geologists Memoir; 1990, vol. 48, p. 239-248. <https://doi.org/10.1306/M48508C4>.
- Owoyemi A.O., Willis B.J. Depositional patterns across syndepositional normal faults, Niger Delta, Nigeria. *Journal of Sedimentary Research*. 2006;76:346-363. <https://doi.org/10.2110/jsr.2006.025>.
- Nton M.E., Adesina A.A. Aspects of structures and depositional environment of sand bodies within Tomboy Field, offshore western Niger Delta, Nigeria. *RMZ-materials and geoenvironment*. 2009;56(3):284-303.
- Ibe A.C., Anyanwu C.P. Geoenvironmental assessment of the Niger Delta region. *Journal of the Geological Society of Nigeria*. 2014;50(2):123-135.
- Doust H., Omatsola E. Niger Delta. In: Edwards J.D., Santogrossi P.A. (eds). *Divergent/passive margin basins*. American Association of Petroleum Geologists Memoir; 1989, vol. 48, p. 201-238.
- Short K.C., Stauble A.J. Outline of geology of Niger Delta. *American Association of Petroleum Geologists Bulletin*. 1967;51(5):761-779. <https://doi.org/10.1306/5D25C0CF-16C1-11D7-8645000102C1865D>.
- Ejedawe J.E. Patterns of incidence of oil and gas in the Niger Delta Basin. *Journal of Petroleum Geology*. 1981;4(2):167-183.
- Bilotti F., Shaw J.H. Deep-water Niger Delta fold and thrust belt modeled as a critical-taper wedge: the influence of elevated basal fluid pressure on structural styles. *American Association of Petroleum Geologists Bulletin*. 2005;89(11):1475-1491. <https://doi.org/10.1306/06130505002>.
- Lambert-Aikhionbare D.O. Relationship between diagenesis and pore fluid chemistry in Niger Delta oil-bearing sands. *Journal of Petroleum Geology*. 1982;4(3):287-298. <https://doi.org/10.1111/j.1747-5457.1982.tb00540.x>.
- Evamy B.D., Haremboure J., Kamerling P., Knaap W.A., Molloy F.A., Rowlands P.H. Hydrocarbon habitat of Tertiary Niger Delta. *American Association of Petroleum Geologists Bulletin*. 1978;62(1):1-39. <https://doi.org/10.1306/C1EA47ED-16C9-11D7-8645000102C1865D>.
- Weber K.J. Sedimentological aspects of oil fields in the Niger Delta. *Geologie en Mijnbouw*, 1971;50(1):559-576.
- Corredor F., Shaw J.H., Bilotti F. Structural styles in the deep-water fold and thrust belts of the Niger Delta. *American Association of Petroleum Geologists Bulletin*. 2005;89(6):753-780. <https://doi.org/10.1306/02170504074>.
- Armentrout J.M., Kanschat K.A., Meisling K.E., Steffens G.S. Neogene turbidite systems of the Niger Delta: Seismic examples and analogues for exploration and reservoir characterization. *American Association of Petroleum Geologists Bulletin*. 2000;84(9):1336-1357.
- Hooper R.J., Fitzsimmons R.J., Grant N., Vendeville B.C. The role of deformation in controlling depositional patterns in the south-central Niger Delta, West Africa. *Journal of Structural Geology*. 2002;24(4):847-859. [https://doi.org/10.1016/S0191-8141\(01\)00122-5](https://doi.org/10.1016/S0191-8141(01)00122-5).
- Knox G.J., Omatsola E.M. Development of the Cenozoic Niger Delta in terms of the "Escalator Regression" model and impact on hydrocarbon distribution. In: Van Der Linden W.J.M., Cloetingh S.A.P.L., Kaasschieter J.P.K., Van De Graaff W.J.E., Vandenbergh J., Van Der Gun J.A.M. (eds). *Coastal Lowlands*. Dordrecht: Springer; 1989, p. 181-202. https://doi.org/10.1007/978-94-017-1064-0_12.



Список источников

1. Obiekezie T.N., Bassey E.E. 3D structural analysis of Otu Field, Niger Delta, Nigeria // *Physical Science International Journal*. 2015. Vol. 7. Iss. 2. P. 114–126. <https://doi.org/10.9734/PSIJ/2015/16512>.
2. Nyantakyi E.K., Hu W., Borkloe J.K. Integrated 3D seismic and petrophysical analysis for hydrocarbon exploration in the Niger Delta // *Petroleum Science and Technology*. 2013. Vol. 31. Iss. 15. P. 1590–1600.
3. Ophori D.U., Gorrington M., Olsen K., Orhua E., Hope J. A preliminary analysis of groundwater chemistry in shallow boreholes, Ughelli, Nigeria // *Journal of Environmental Hydrology*. 2007. Vol. 15. Available from: <http://www.hydroweb.com/protect/pubs/jeh/jeh2007/ophori.pdf> [Accessed 18th February 2025].
4. Doust H., Omatsola E. Niger Delta // *Divergent/passive margin basins* / eds J.D. Edwards, P.A. Santogrossi. American Association of Petroleum Geologists Memoir, 1990. Vol. 48. P. 239–248. <https://doi.org/10.1306/M48508C4>.
5. Owoyemi A.O., Willis B.J. Depositional patterns across syndepositional normal faults, Niger Delta, Nigeria // *Journal of Sedimentary Research*. 2006. Vol. 76. P. 346–363. <https://doi.org/10.2110/jsr.2006.025>.
6. Nton M.E., Adesina A.A. Aspects of structures and depositional environment of sand bodies within Tomboy Field, offshore western Niger Delta, Nigeria // *RMZ-materials and geoenvironment*. 2009. Vol. 56. Iss. 3. P. 284–303.
7. Ibe A.C., Anyanwu C.P. Geoenvironmental assessment of the Niger Delta region // *Journal of the Geological Society of Nigeria*. 2014. Vol. 50. Iss. 2. P. 123–135.
8. Doust H., Omatsola E. Niger Delta // *Divergent/passive margin basins* / eds J.D. Edwards, P.A. Santogrossi. American Association of Petroleum Geologists Memoir, 1989. Vol. 48. P. 201–238.
9. Short K.C., Stauble A.J. Outline of geology of Niger Delta // *American Association of Petroleum Geologists Bulletin*. 1967. Vol. 51. Iss. 5. P. 761–779. <https://doi.org/10.1306/5D25C0CF-16C1-11D7-8645000102C1865D>.
10. Ejedawe J.E. Patterns of incidence of oil and gas in the Niger Delta Basin // *Journal of Petroleum Geology*. 1981. Vol. 4. Iss. 2. P. 167–183.
11. Bilotti F., Shaw J.H. Deep-water Niger Delta fold and thrust belt modeled as a critical-taper wedge: the influence of elevated basal fluid pressure on structural styles // *American Association of Petroleum Geologists Bulletin*. 2005. Vol. 89. Iss. 11. P. 1475–1491. <https://doi.org/10.1306/06130505002>.
12. Lambert-Aikhionbare D.O. Relationship between diagenesis and pore fluid chemistry in Niger Delta oil-bearing sands // *Journal of Petroleum Geology*. 1982. Vol. 4. Iss. 3. P. 287–298. <https://doi.org/10.1111/j.1747-5457.1982.tb00540.x>.
13. Evamy B.D., Haremboure J., Kamerling P., Knaap W.A., Molloy F.A., Rowlands P.H. Hydrocarbon habitat of Tertiary Niger Delta // *American Association of Petroleum Geologists Bulletin*. 1978. Vol. 62. Iss. 1. P. 1–39. <https://doi.org/10.1306/C1EA47ED-16C9-11D7-8645000102C1865D>.
14. Weber K.J. Sedimentological aspects of oil fields in the Niger Delta // *Geologie en Mijnbouw*, 1971. Vol. 50. Iss. 1. P. 559–576.
15. Corredor F., Shaw J.H., Bilotti F. Structural styles in the deep-water fold and thrust belts of the Niger Delta // *American Association of Petroleum Geologists Bulletin*. 2005. Vol. 89. Iss. 6. P. 753–780. <https://doi.org/10.1306/02170504074>.
16. Armentrout J.M., Kanschak K.A., Meisling K.E., Steffens, G. S. Neogene turbidite systems of the Niger Delta: Seismic examples and analogues for exploration and reservoir characterization // *American Association of Petroleum Geologists Bulletin*. 2000. Vol. 84. Iss. 9. 1336–1357.
17. Hooper R.J., Fitzsimmons R.J., Grant N., Vendeville B.C. The role of deformation in controlling depositional patterns in the south-central Niger Delta, West Africa // *Journal of Structural Geology*. 2002. Vol. 24. Iss. 4. P. 847–859. [https://doi.org/10.1016/S0191-8141\(01\)00122-5](https://doi.org/10.1016/S0191-8141(01)00122-5).
18. Knox G.J., Omatsola E.M. Development of the Cenozoic Niger Delta in terms of the “Escalator Regression” model and impact on hydrocarbon distribution // *Coastal Lowlands* / eds W.J.M. Van Der Linden, S.A.P.L. Cloetingh, J.P.K. Kaaschieter, W.J.E. Van De Graaff, J. Vandenberghe, J.A.M. Van Der Gun. Dordrecht: Springer, 1989. P. 181–202. https://doi.org/10.1007/978-94-017-1064-0_12.

Information about the author / Информация об авторе



Mohammed Abubakar Mohammed,

Ph.D.,

Research Engineer,

Siberian School of Geosciences,

Irkutsk National Research Technical University,

Irkutsk, Russia,

✉ mmbaama@gmail.com; mmohammed@geo.istu.edu

<https://orcid.org/0009-0008-1298-6117>

Мохаммед Абубакар Мохаммед,

доктор наук,

инженер-исследователь,

институт «Сибирская школа геонаук»,

Иркутский национальный исследовательский технический университет,

г. Иркутск, Россия,

✉ mmbaama@gmail.com; mmohammed@geo.istu.edu

<https://orcid.org/0009-0008-1298-6117>



Contribution of the author / Вклад автора

The author performed the research, made a generalization on the basis of the results obtained and prepared the copyright for publication.

Автор выполнил исследовательскую работу, на основании полученных результатов провел обобщение, подготовил рукопись к печати.

Conflict of interests / Конфликт интересов

The author declares no conflict of interests.

Автор заявляет об отсутствии конфликта интересов.

The final manuscript has been read and approved by the author.

Автор прочитал и одобрил окончательный вариант рукописи.

Information about the article / Информация о статье

The article was submitted 28.04.2025; approved after reviewing 12.05.2025; accepted for publication 29.05.2025.

Статья поступила в редакцию 28.04.2025; одобрена после рецензирования 12.05.2025; принята к публикации 29.05.2025.



ГЕОФИЗИКА

Научная статья

УДК 550.8

EDN: KWATNN

DOI: 10.21285/2686-9993-2025-48-2-204-223



Разработка методики и оптимального комплекса геофизических исследований при выделении перспективных областей на наличие рудного золота в пределах Каспинского рудного узла

И.В. Трофимов^{a✉}, Е.Д. Валькова^b, А.В. Лазурченко^c, А.П. Степанов^d, А.Ю. Давыденко^e^{a-e}Иркутский национальный исследовательский технический университет, Иркутск, Россия^eИркутский государственный университет, Иркутск, Россия

Резюме. В статье представлены результаты применения комплекса геофизических методов для изучения Каспинского рудного узла в Красноярском крае. Цель исследования заключалась в оценке эффективности различных современных методов при решении задачи выделения границ интрузивных массивов и анализе тектонических нарушений, которые играют ключевую роль в формировании золото-сульфидно-кварцевого оруденения. Геофизический комплекс включал в себя беспилотную магниторазведку (комплекс SibGIS UAS), бесконтактное измерение электрического поля (аппаратный комплекс БИКС) и электромагнитное зондирование с вызванной поляризацией (аппаратно-программный комплекс «Марс»). Магниторазведка позволила выделить малые диоритовые массивы Ольховского комплекса и их контакты с карбонатными отложениями, а также выявить тектонические нарушения. Электроразведочные работы способствовали анализу мелких разломов и распределения вызванной поляризации, что важно для поиска зон минерализации. Также в рамках исследования была выполнена трехмерная каскадная инверсия магниторазведочных данных для локализации интрузивных тел. В результате проведенной работы был сделан вывод о том, что представленная методика не является оптимальной, комплекс геофизических методов является избыточным. В дальнейших исследованиях предлагается исключить метод бесконтактного измерения электрических полей из-за малого количества полезной информации и проблем в интерпретации по сравнению с методом электромагнитного зондирования и вызванной поляризации. Помимо этого, основным изменением в методике является последовательность этапов выполнения работ. Полученные в результате проведенного исследования данные послужили одной из основ для постановки буровых работ поискового этапа.

Ключевые слова: метод электромагнитного зондирования и вызванной поляризации, беспилотная магниторазведка, Красноярский край, Каспинский рудный узел, трехмерная каскадная инверсия

Для цитирования: Трофимов И.В., Валькова Е.Д., Лазурченко А.В., Степанов А.П., Давыденко А.Ю. Разработка методики и оптимального комплекса геофизических исследований при выделении перспективных областей на наличие рудного золота в пределах Каспинского рудного узла // Науки о Земле и недропользование. 2025. Т. 48. № 2. С. 204–223. <https://doi.org/10.21285/2686-9993-2025-48-2-204-223>. EDN: KWATNN.

GEOPHYSICS

Original article

Development of a methodology and an optimal complex of geophysical studies when identifying ore gold promising areas within Kaspinsky ore cluster

Ilya V. Trofimov^{a✉}, Evgeniya D. Valkova^b, Anton V. Lazurchenko^c,
Aleksandr P. Stepanov^d, Aleksandr Yu. Davydenko^e^{a-e}Irkutsk National Research Technical University, Irkutsk, Russia^eIrkutsk State University, Irkutsk, Russia

Abstract. The article presents the application results of a set of geophysical methods to study the Kaspinsky ore cluster in the Krasnoyarsk Krai. The purpose of the study was to evaluate the efficiency of various modern methods when solving the problem of identifying the boundaries of intrusive massifs and analyzing tectonic disturbances that play a key role in the formation of gold-sulfide-quartz mineralization. The geophysical complex included unmanned magnetic exploration



(SibGIS UAS complex), non-contact electric field measurement (BIKS non-contact measurement of electric field hardware complex) and electromagnetic sensing with induced polarization (Mars hardware and software complex). Magnetic exploration allowed to identify small diorite massifs of the Olkhovsky complex and their contacts with carbonate deposits, as well as to identify tectonic faults. Electrical exploration contributed to the analysis of small faults and distribution of induced polarization, which is important when searching for mineralization zones. Also, the study included a three-dimensional cascade inversion of magnetic exploration data for intrusive body localization. Conducted work resulted in the conclusion that the presented methodology is not optimal and the complex of geophysical methods is redundant. It is proposed to exclude the method of non-contact measurement of electric fields in further researches due to the small amount of useful information and interpretation problems as compared with the method of electromagnetic sensing and induced polarization. In addition, the main change in the methodology is the sequence of work stages. The data obtained as a result of the conducted research served as one of the bases for setting up drilling operations at the exploration stage.

Keywords: electromagnetic sounding and induced polarization method, unmanned magnetic exploration, Krasnoyarsk Krai, Kaspinsky ore cluster, three-dimensional cascade inversion.

For citation: Trofimov I.V., Valkova E.D., Lazurchenko A.V., Stepanov A.P., Davydenko A.Yu. Development of a methodology and an optimal complex of geophysical studies when identifying ore gold promising areas within Kaspinsky ore cluster. *Earth sciences and subsoil use*. 2025;48(2):204-223. (In Russ.). <https://doi.org/10.21285/2686-9993-2025-48-2-204-223>. EDN: KWATNN.

Введение

Красноярский край занимает одно из лидирующих мест среди регионов России по объемам добычи золота. Этот регион традиционно считается одним из самых перспективных для разработки как россыпного, так и коренного золота¹. Одной из значимых рудных областей является водораздельная зона Каспинского рудного узла, где экономическая деятельность преимущественно связана с горнодобывающими предприятиями².

Перед развитием любого направления, будь это геофизика или другая сфера деятельности человека, ставится цель, которая заключается в оптимизации рабочего процесса, что приводит к снижению себестоимости конечного продукта. Таким образом, горнодобывающая компания может позволить себе разведывать перспективные области и ввести в эксплуатацию за короткий срок.

Актуальность проведенной работы обусловлена необходимостью повышения эффективности геологоразведочных работ в схожих геологических ситуациях за счет использования современных методов геофизики. Цель исследования заключалась в оценке эффективности различных современных методов при решении задачи выделения границ интрузивных массивов и анализе тектонических нарушений. Для достижения поставленных целей был применен комплекс геофизических методов, включающий беспилотную магниторазведку, бесконтактное измерение

электрического поля (БИЭП) и электромагнитное зондирование с вызванной поляризацией.

Район исследований расположен в пределах юго-западных отрогов Восточного Саяна. Рельеф характеризуется низкогорным расчленением с абсолютными высотами от 450 до 750 м над уровнем моря. Относительные высоты водоразделов достигают 250–400 м, а крутизна склонов колеблется от 5–10° в верхней части до 20–35° в средней и нижней частях. Территория покрыта хвойными, преимущественно пихтовыми, лесами с густым подлеском и многочисленными завалами. Обнаженность пород в районе ограничена, что усложняет визуальное наблюдение за геологическими объектами (рис. 1).

В геологическом отношении рассматриваемая площадь представлена отложениями различных возрастов: рифейскими, кембрийскими, ордовикскими и четвертичными [1, 2]. Наиболее перспективной для оруденения является балахтисонская свита (Є1bl). Она состоит из рифогенных известняков светло-серых массивных пород, реже темно-серых слоистых известково-глинистых сланцев и песчаников. Нижняя часть свиты характеризуется прослаиванием темно-серых известняков, глинистых известняков, алевролитов, тогда как верхняя часть представлена массивными светлыми известняками. Отложения данной свиты отличаются неустойчивостью и часто фациально замещают друг друга.

¹ Добыча золота в России: основные регионы и компании-лидеры // Dprom.online. Режим доступа: <https://dprom.online/popular/dobicha-zolota-v-rosseeee-ryegeeeoni-kompaneeee/> (дата обращения: 27.03.2025).

² N-46-XVI (Артемовск). Государственная геологическая карта Российской Федерации масштаба 1:200000. Издание второе. Минусинская серия. Объяснительная записка. СПб.: Изд-во ВСЕГЕИ, 2006. 215 с.

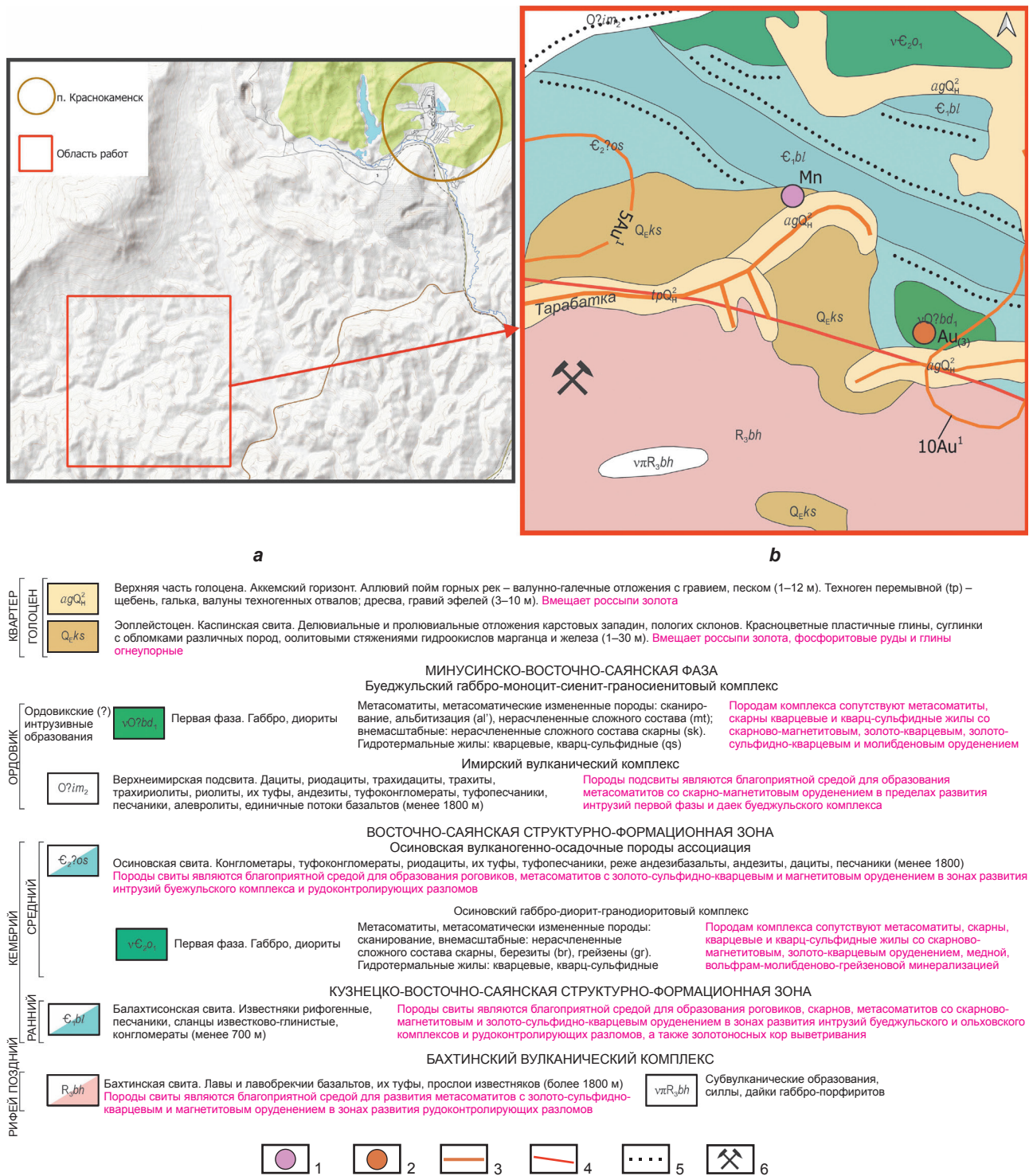


Рис. 1. Обзорная (а) и геологическая (б) карты исследуемой площади:

1 – пункт минерализации молибдена; 2 – малое проявление золота; 3 – малые месторождения россыпного золота; 4 – рудоконтролирующие разрывные нарушения; 5 – геологические границы между фациально разными образованиями с постепенным переходом; 6 – эксплуатируемое месторождение

Fig. 1. General (a) and geological (b) maps of the area under investigation:

1 – molybdenum mineralization point; 2 – minor gold occurrence; 3 – small gold placers; 4 – ore-controlling faults; 5 – geological boundaries between facies-different formations with gradual transition; 6 – producing field

Особый интерес представляет экзоконтакт карбонатных пород балахтисонской свиты с интрузивными телами. Здесь породы подвергаются мраморизации и частичному скарни-

рованию. Литогеохимические исследования показывают, помимо присутствия золота, повышенное содержание марганца вблизи этих контактов [3, 4].



Материалы и методы исследования

Магниторазведочная съемка должна была позволить выделить малые диоритовые массивы Ольховского комплекса и их контакты с карбонатными отложениями балахтисонской свиты. Эти контакты являются важными контролирующими факторами для золотого оруденения. Кроме того, метод помогает выявлять основные тектонические нарушения, которые играют ключевую роль в формировании минерализации [5, 6].

Для выполнения маловысотной магниторазведочной съемки в условиях пересеченного рельефа применялся мультироторный беспилотный комплекс SibGIS UAS с магниторазведочным оборудованием [7–9] (рис. 2). В качестве полезной нагрузки использовался высокоточный протонный оверхаузеровский магнитометр POS [10, 11].

Для обеспечения съемки с обтеканием рельефа была создана цифровая модель рельефа на основе глобального информационно-картографического продукта Intermap NextMap с разрешением 5 м на пиксель и вертикальной точностью ± 3 м (LE90). Высота съемки составила 50 м над поверхностью с учетом высоты растительности.

Полетные миссии планировались с помощью специально созданного программного обеспечения UAV Waypointer (авторами моду-

ля являются С.А. Терешкин и А.Н. Костерев), что позволило обеспечить регулярную сеть профилей с погрешностью высоты не более 10 % от номинальной и поддержанием постоянной скорости полета (рис. 3).

Магнитометрические измерения проводились с частотой 2 Гц (шаг между точками по профилю 4 м). Вариационные наблюдения выполнялись с периодом два раза в минуту, что соответствует требованиям магнитной съемки рядовой точности [12].

Для обеспечения более точной геометризации диоритовых массивов как в плане, так и в 3D, была выполнена каскадная векторная инверсия данных магнитной съемки. Суть такого подхода заключается в решении обратных задач с определением индуктивной и остаточной составляющих намагниченности для последовательно выделяемых в интерпретируемом магнитном поле локальных аномалий [13, 14].

Выделение аномалий производится по обобщенному показателю, который является взвешенной характеристикой (первой главной компонентой) показателей аномальности, полученных для площади множеством скользящих двумерных окон различного размера. В качестве показателя аномальности используется L_1 – норма вектора значений поля, полученного выборкой в окне значений централизованного относительно фона поля ΔT .



Рис. 2. Мультироторный беспилотный комплекс SibGIS UAS
в варианте маловысотной магниторазведки

Fig. 2. Multirotor unmanned complex SibGIS UAS in the low-altitude magnetic exploration version

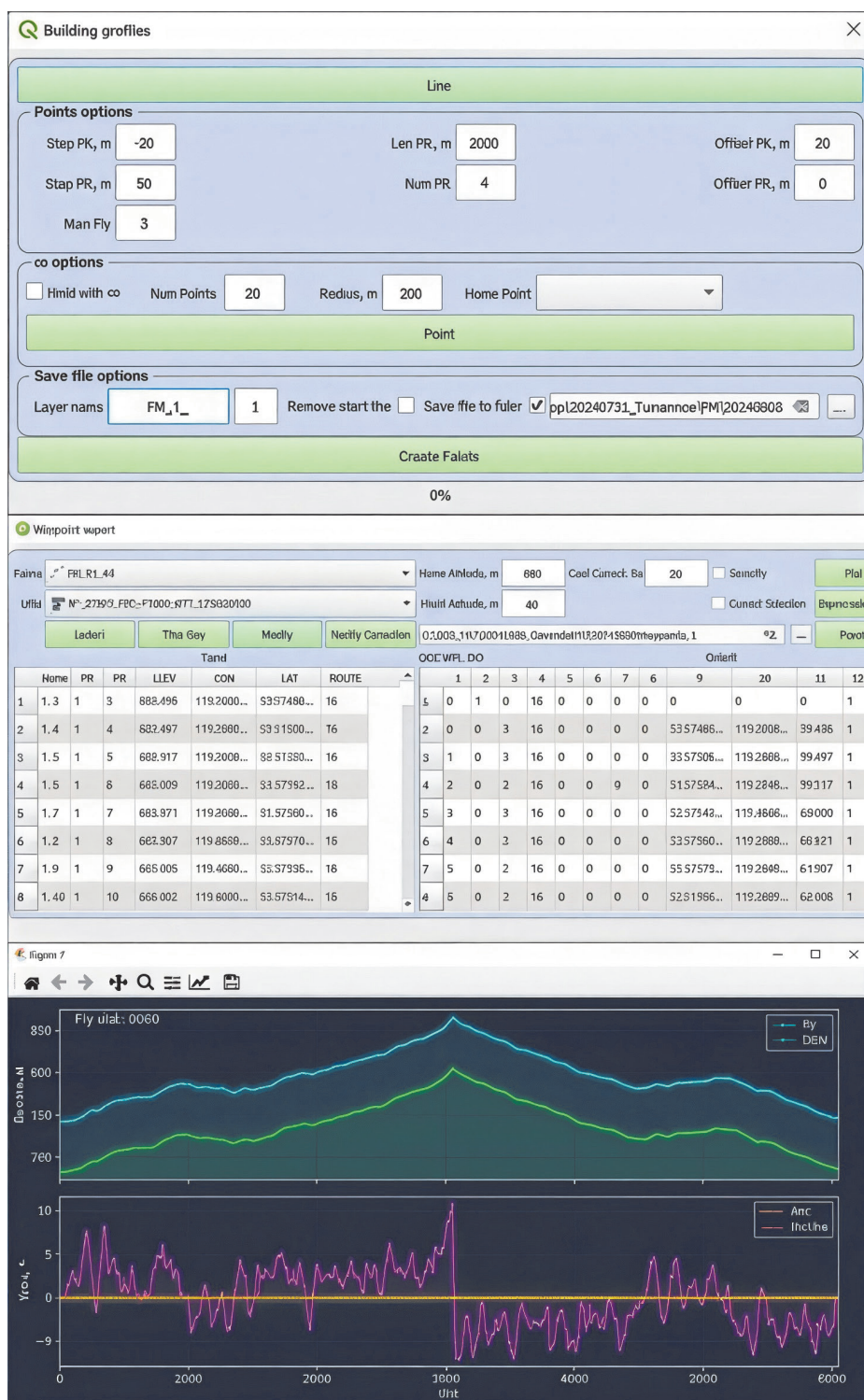


Рис. 3. Программный модуль UAV Waypointer для создания полетных миссий с обтеканием рельефа
Fig. 3. UAV Waypointer software module for creating flight missions with terrain flowing

Определение вектора остаточной намагниченности по выделенной аномалии возможно при известной геометрии объекта, предположениях об однородности его остаточной намагниченности и о возможных значениях магнитной восприимчивости, определяющей индуктивную составляющую поля. Для создания этих условий в алгоритме каскадной ин-

версии используются сеточные модели, что позволяет по выделенной аномалии локализовать объем ячеек, включающий потенциальный магнитный объект.

Далее организуется векторное сканирование, а именно: перебор по регулярной решетке параметров вектора остаточной намагниченности (коэффициент Кёнигсбер-



гера Q , склонение D_r и наклонение I_r). Для каждого элемента множества возможных значений этих параметров проводится инверсия локальной аномалии в соответствующий ей объем сеточной модели, что позволяет для каждого вектора остаточной намагниченности определить геометрию и магнитную восприимчивость множества ячеек, соответствующих потенциальному магнитному объекту.

Для локализации объектов используется фокусирующая инверсия магнитного поля на основе алгоритма робастной регрессии по методу эластичной сети, который основан на минимизации функционала и является взвешенной комбинацией норм L_2 и L_1 [11]. Вариант инверсии, соответствующий минимуму невязки локальной аномалии и модели инверсии, определяет значение параметров вектора остаточной намагниченности (коэффициент Кёнигсбергера Q , склонение D_r и наклонение I_r) объекта, выделенного в объеме сеточной модели.

Уточнение решения производится путем последовательного сгущения узлов задания Q , D_r , I_r , причем на каждой итерации центральный узел определяют значения параметров, найденные по полученному в результате инверсии вектору суммарной намагниченности и его индуктивной составляющей, соответствующей среднему значению магнитной восприимчивости локального объекта. Начальное приближение центрального узла задается угловыми параметрами нормального поля и ограничением сверху значения коэффициента Q (в данном случае при инверсии были приняты: максимальное значение $Q = 3$; диапазон возможных значений магнитной восприимчивости 10^{-5} – $0,1$ СИ).

В связи с тем что геометрия и магнитные свойства выделяемых последовательной инверсией объектов в той или иной мере осложнены неполным учетом влияния еще не выделенных объектов или ошибками этой же природы, внесенными уже проведенными инверсиями, проводится автоматическая коррекция полученных результатов. При этом также соблюдается принцип монотонного убывания невязки для последовательно корректируемых моделей отдельных объектов.

В процессе интерпретации линейные размеры используемых сеточных моделей и их ячеек последовательно уменьшаются,

что позволяет с помощью больших моделей исключать эффекты глубокозалегающих и законтурных магнитных неоднородностей, формирующих общий фон поля для обрабатываемой площади. Для каждой следующей модели размер ячейки уменьшается в два раза, что позволяет получать более детальные модели распределения магнитных объектов в изучаемом объеме геологической среды.

Электроразведочные работы, как и магниторазведочная съемка, должны способствовать детальному анализу более мелких разломов, а также прослеживанию распространения балахтисонской свиты (Є1bl) и исследованию распределения вызванной поляризации. Последнее особенно важно, так как зоны повышенной вызванной поляризации, предположительно, пространственно совпадают с участками оруденения [15].

В рамках данного проекта были апробированы два метода электроразведки: БИЭП как быстрый и недорогой способ изучения сопротивления горных пород верхней части разреза, и более глубокий, медленный и дорогой метод электромагнитного зондирования с вызванной поляризацией.

Преимущества метода БИЭП заключаются в отсутствии необходимости заземления и возможности работы на снегу, куруме, мерзлоте и т. д., в постоянной геометрии установки, определяющей простоту и скорость обработки данных, а также в небольшом количестве задействованных специалистов (от трех человек). Производительность такой съемки может составлять до 5 пог. км в день даже в не самых благоприятных условиях, вследствие чего стоимость работ невысока. Следовательно, в случае получения положительного результата апробации метода БИЭП на участке, в более трудоемких и дорогостоящих методах электроразведки нет необходимости. Однако небольшая глубинность исследований в совокупности с отсутствием обнаженности коренных горных пород с априори неясной мощностью перекрывающих отложений не позволяла быть уверенным в эффективности и достаточности данного метода в конкретных ландшафтно-морфологических и геологических условиях.

Работы методом БИЭП выполнялись с использованием аппаратного комплекса БИКС



[16–19], предназначенного для решения геолого-разведочных и инженерно-геологических задач. Аппаратный комплекс БИКС, краткая характеристика которого представлена в таблице, позволяет применять методы электропрофилирования и геометрического зондирования с дипольными емкостными линиями.

Шаг между пикетами составил 10 м, а между профилями – 100 м. Длина используемых диполей равнялась 10 м, расстояние между генератором и приемником составило 100 м. Расстояния между диполями фиксировались с помощью нерастягивающейся веревки (рис. 4). Данная конфигурация обеспечила получение значений кажущегося сопротивления в верхней части разреза на псевдоглубине до 50 м [20].

Особенностью такого метода электро-разведки, как электромагнитное зондирование и вызванная поляризация, является сочетание в одной системе измерений методами переходных процессов и обычных гальванических измерений на прямом токе. Установка имеет закрепленный генераторный источник и перемещающийся относительно него измеритель, подобно методам срединного градиента, но благодаря возможности моделирования можно измерять большой планшет с одной раскладки питающей линии. Данный метод предполагает гальваническое заземление и питающих, и приемных электродов, в связи с чем, несмотря на использование приемных модулей с высокоомным входом, производство измерений на курумах, на снегу и т. д. гораздо более трудоемко, чем в методах

БИЭП. Разрез возбуждается импульсами тока через электрический диполь, а разность потенциалов измеряется на приемных электродах. Метод обеспечивает глубину до 500 м и более в благоприятных геологических условиях, однако инверсия данных для систем нестационарной геометрии трудоемка, производительность полевых работ примерно в два раза ниже в методах БИЭП, соответственно, стоимость существенно выше.

Для реализации данного метода использовался аппаратно-программный электроразведочный комплекс (АПЭК) «Марс» (рис. 5), состоящий из следующих блоков [19]:

1. Генератор разнополярных импульсов тока, формирующий заданную им последовательность (включает в себя источник стабилизированного тока и коммутатор разнополярных импульсов).

2. Регистратор разности потенциалов электроразведочный, обеспечивающий сбор данных и включающий аналого-цифровой преобразователь, блок спутниковой синхронизации, модуль сохранения первичных данных и USB-интерфейс для подключения персонального компьютера.

3. Блок GPS-синхронизации для координации работы приемной и силовой аппаратуры при разнесенных источниках возбуждения и приема.

4. Управляющая программа, позволяющая контролировать качество записи на экране полевого компьютера.

Шаг между пикетами составил 25 м, а между профилями – 100 м. Для достижения глубинности исследований до 500 м и более

Краткий список характеристик аппаратного комплекса БИКС

Brief list of characteristics of electric field non-contact measurement hardware complex BIKS

Аппаратный комплекс БИКС			
Генератор		Измеритель	
Рабочая частота	16,6±0,2 кГц	Рабочая частота	16,6±0,2 кГц
Амплитудные значения выходного тока	1, 3, 10 мА	Полоса пропускания	Не более 20 Гц
Точность стабилизации выходного тока	±5 %	–	–

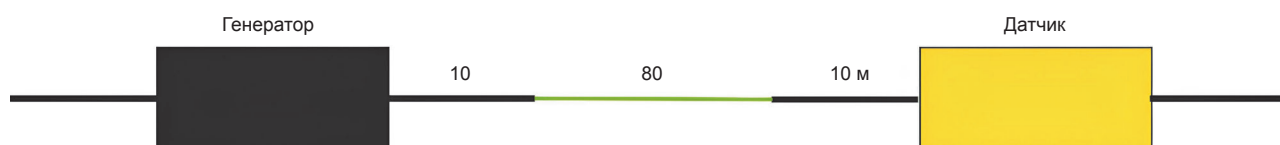


Рис. 4. Схема рабочей установки
Fig. 4. Working installation diagram

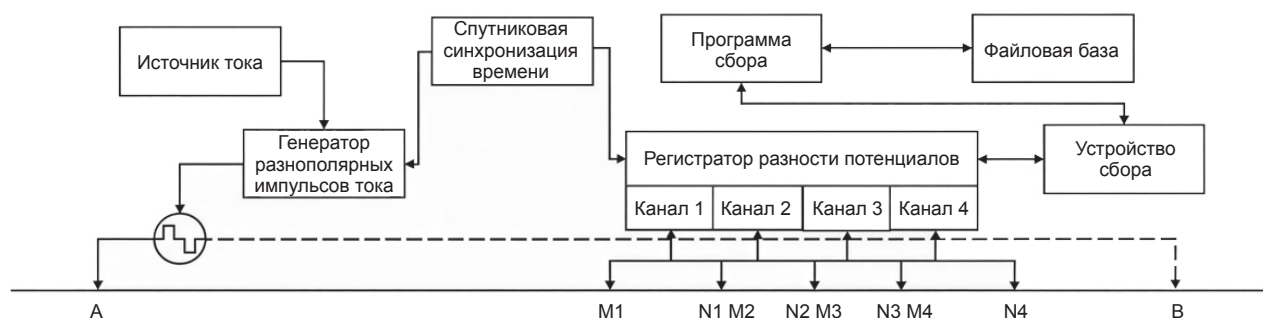


Рис. 5. Схема аппаратно-программного электроразведочного комплекса «Марс» на примере с четырехканальным регистратором разности потенциалов
Fig. 5. Diagram of “Mars” hardware and software electrical exploration complex on the example of four-channel potential difference recorder

применялась технология регистрации нестационарного электромагнитного поля. Длина питающей линии АВ составила 2905 м, а период прямоугольного разнополярного импульса равнялся 1 с (импульс – 250 мс, пауза – 250 мс).

Для оценки качества выполненных исследований были проведены контрольные измерения в объеме 5 % от общего объема работ. Полученные результаты показали следующее:

1. Среднеквадратическое отклонение по методу БИЭП составило менее 5 Ом·м.
2. По методу беспилотной магниторазведки отклонение не превысило 5 нТл.
3. По методу электромагнитного зондирования и вызванной поляризации средняя сходимость, рассчитанная по всему временному диапазону кривой становления, осталась в пределах допустимых 5 %.

Результаты исследования и их обсуждение

На начальном этапе обработки исходные данные магнитометрической съемки, полученные с использованием беспилотного летательного аппарата, были проанализированы и отсортированы. Дальнейшая обработка включала следующие шаги:

1. Внесение вариационных и аппаратных поправок для коррекции данных.
2. Выделение классов подлетно-разворотных маршрутов, рядовых и контрольных профилей.
3. Увязка и разбраковка маршрутных наблюдений.

Для выявления особенностей геологического строения и детального анализа точечных аномалий была рассчитана локальная составляющая магнитного поля. Метод раз-

деления поля основан на расчетах средних значений в скользящем окне изменяемого радиуса, осуществляет частотную селекцию исходного поля и дает возможность выделения региональной и локальной составляющих заданной частоты. В зависимости от радиуса скользящего окна обеспечивается возможность выбора аномалий из спектра частот исследуемого поля либо интервала глубин залегания горных пород. Магнитное поле разделено на региональную и локальную составляющие путем осреднения в скользящем окне, радиус осреднения 150 м. Результат первичной обработки данных представлен на рис. 6.

Карта локальной составляющей магнитного поля дает представление о строении верхней части разреза. Она акцентирует зоны наибольшего изменения поля, что указывает на наличие вертикальных границ в разрезе (различные штокверки и т. д.).

На карте четко видны мелкие детали геологического строения. Контуры локальных магнитных аномалий отражают изменения литологического состава пород, а также зоны тектонических нарушений.

Перед построением карт распределения кажущегося удельного электрического сопротивления (УЭС) выполняется привязка всех измерений к абсолютным координатам. Это обеспечивает точное географическое позиционирование полученных данных. Далее проводится фильтрация всего объема информации для исключения забракованных точек измерения, что повышает достоверность полученной карты. При использовании одного разноса длиной 100 м методом БИЭП строится карта распределения кажущегося УЭС на глубине, равной половине разноса (50 м) (рис. 7).

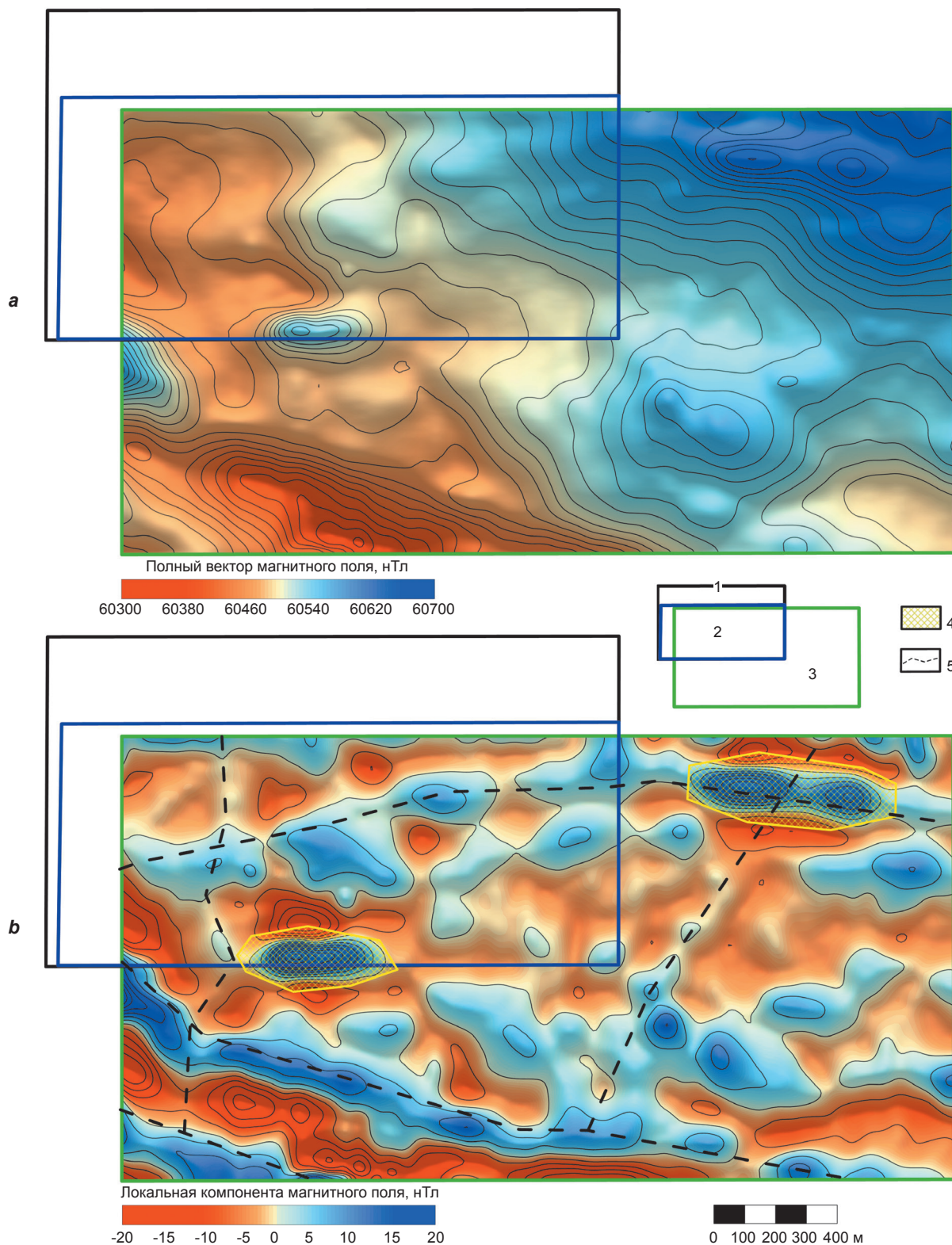


Рис. 6. Карты полного вектора магнитного поля (а) и локальной составляющей магнитного поля (б):
1 – контур участка применения метода электромагнитного зондирования и вызванной поляризации;
2 – контур участка применения метода бесконтактного измерения электрического поля; 3 – контур участка магниторазведки; 4 – перспективные аномальные зоны по данным магниторазведки;
5 – предполагаемые разломные зоны

Fig. 6. Maps of the full magnetic field vector (a) and the local component of the magnetic field (b):
1 – contour of the application area of the electromagnetic sounding and induced polarization method;
2 – contour of the application area of the non-contact electric field measurement method; 3 – contour of the magnetic exploration area; 4 – promising anomalous zones according to magnetic exploration data;
5 – assumed fault zones

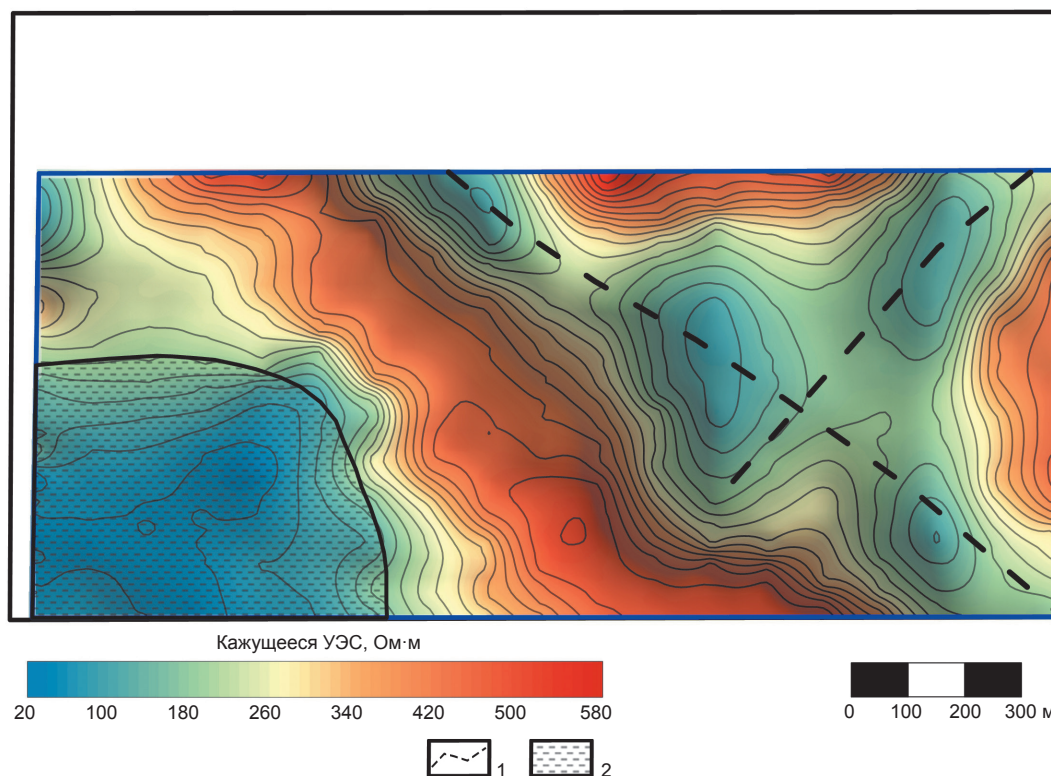


Рис. 7. Карта распределения кажущегося удельного электрического сопротивления (метод бесконтактного измерения электрического поля):

1 – предполагаемые разрывные нарушения; 2 – заболоченная область

Fig. 7. Map of apparent specific electrical resistance distribution (method of non-contact electric field measurement):

1 – assumed faults; 2 – swampy area

На полученной карте четко прослеживаются структуры с различными значениями УЭС:

- зоны с высокими значениями сопротивления, которые могут указывать на наличие малопористых или маловодных пород, таких как интрузивные массивы;

- области с низкими значениями сопротивления, которые ассоциируются с гидротермально измененными породами, трещиноватыми зонами или участками, насыщенными водой.

Таким образом, метод БИЭП позволил картировать приповерхностные разломы и, возможно, проследить зону разрушения интрузивного массива.

Совместная интерпретация метода беспилотной магниторазведки и БИЭП, которые основываются на разных законах, является очень важным этапом. Такой анализ позволяет учесть все особенности строения участка. Так, более глубокий метод (магниторазведка) видит большинство разрывных нарушений, которые скрыты мощным слоем четвертичных отложений, но может пропустить нарушения в самой верхней части участка (10–30 м). В таком случае использование метода БИЭП

позволит выделить пропущенные разломные зоны (рис. 8).

Разломы, которые выделяются по методам, имеющим разную глубинность, могут не сходиться точь-в-точь. Это может быть обусловлено углом падения разлома. Первичная обработка данных электромагнитных зондирований с вызванной поляризацией включает в себя четыре этапа.

1. Очистка данных: удаление испорченных реализаций, которые не соответствуют критериям качества.

2. Подавление шумов: снижение влияния промышленных помех для повышения точности результатов.

3. Робастная фильтрация: применение двумерного скользящего окна для выравнивания данных и исключения аномалий.

4. Интеграция: объединение обработанных данных в результирующую кривую для последующего анализа.

На основе полученных после первичной обработки данных строятся карты кажущихся параметров, которые позволяют оценить электрические свойства подземных сред на различных глубинах (рис. 9).

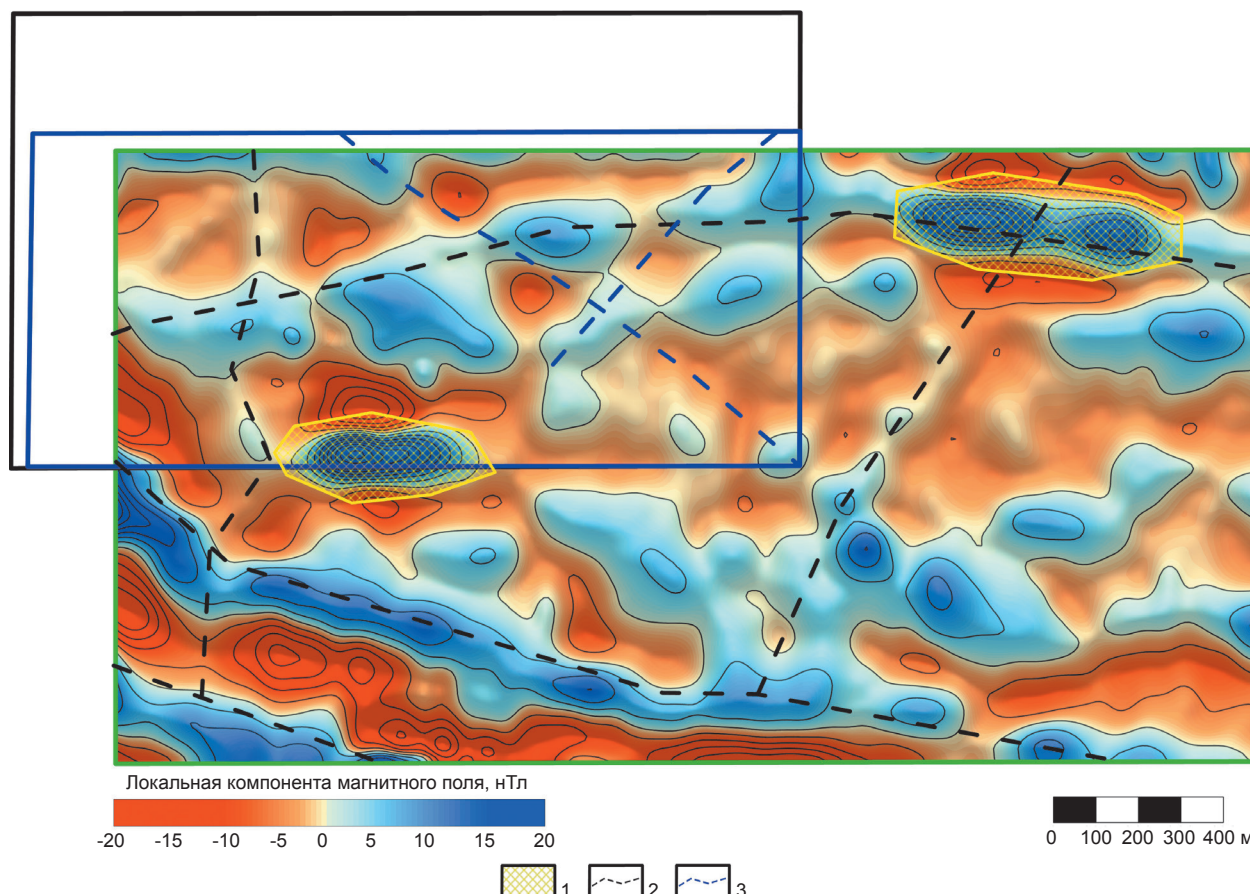


Рис. 8. Совместная интерпретация данных, полученных с помощью беспилотной магниторазведки и метода бесконтактного измерения электрического поля:

1 – перспективные аномальные зоны, выделенные по данным магниторазведки; 2 – предполагаемые разрывные нарушения, выделенные по данным магниторазведки; 3 – предполагаемые разрывные нарушения по данным, полученным с помощью метода бесконтактного измерения электрического поля

Fig. 8. Combined interpretation of data obtained using unmanned magnetic exploration and non-contact electric field measurement method:

1 – promising anomalous zones identified according to magnetic exploration data; 2 – assumed faults identified according to magnetic exploration data, 3 – assumed faults according to the data obtained using the method of non-contact electric field measurement

Предположительно, высокоомные аномалии связаны с телами габбро-диоритов Ольховского комплекса в верхней части разреза. Поляризуемость, как уже было сказано, выделяет экзоконтакт Ольховского комплекса с карбонатными отложениями балахтисонской свиты и показывает степень его проявления.

В отличие от предыдущего случая анализа магниторазведочных данных и метода БИЭП, одна из задач, которая была поставлена при совместной интерпретации данных методов БИЭП и электромагнитного зондирования и вызванной поляризации, заключалась в подтверждении или опровержении выделенных разрывных нарушений ранее методом БИЭП (рис. 10). Схожие разломные области, которые были получены двумя электроразведоч-

ными методами, имеющие разный принцип действия, будут являться подтверждением наличия разломных структур.

Результаты, полученные с помощью методов электромагнитного зондирования и вызванной поляризации и БИЭП, демонстрируют слабую корреляцию между собой. По всей видимости, это связано с наличием на площади глин большой мощности, которые способствуют накоплению влаги. В результате низкоомный слой выступает в роли своеобразного экрана для метода БИЭП, что существенно снижает глубинность исследования. Метод электромагнитного зондирования и вызванной поляризации, в отличие от метода БИЭП, позволил изучить более глубокие горизонты и получить данные о строении коренных пород.

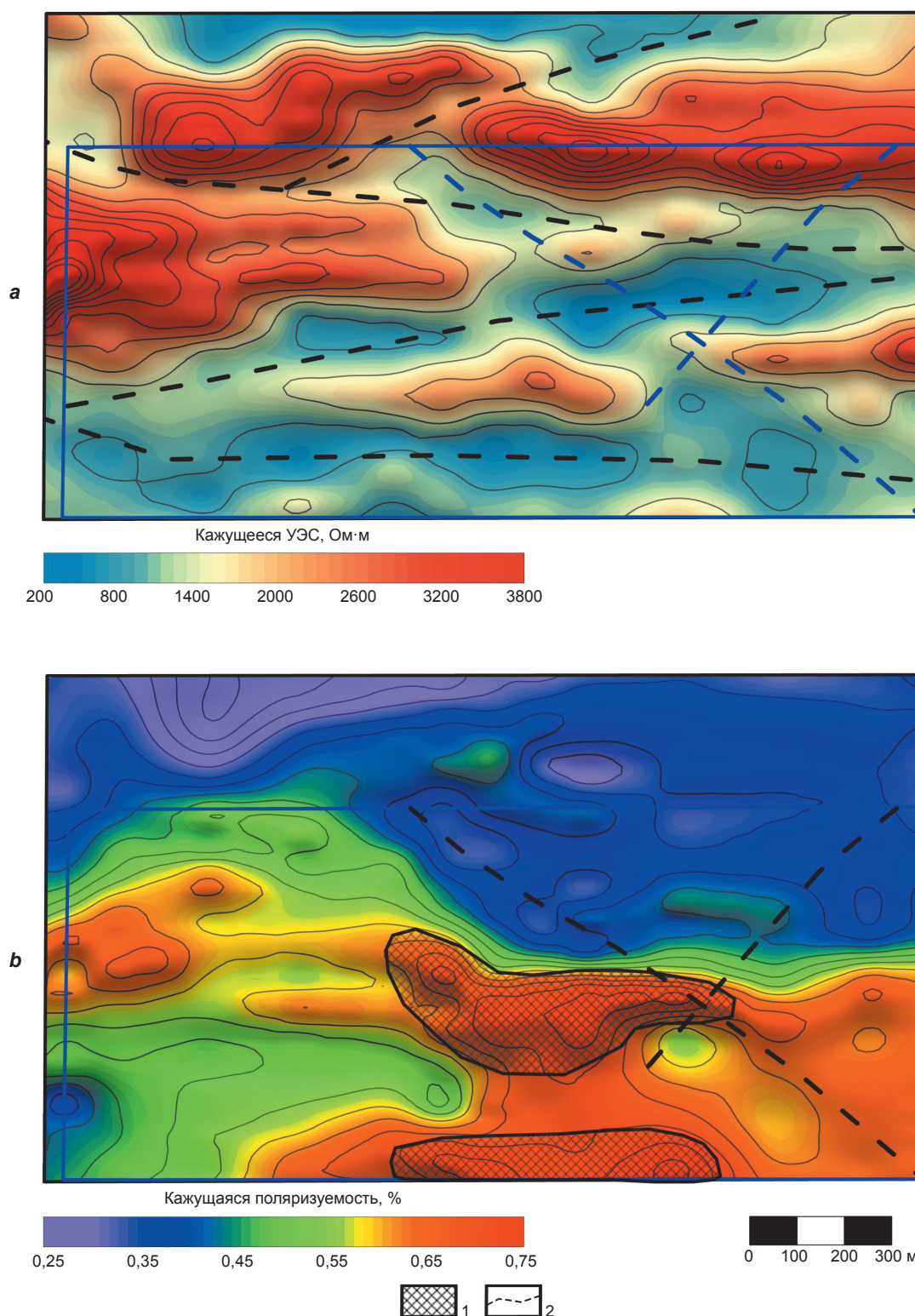


Рис. 9. Карты распределения кажущихся параметров, полученных методом электромагнитного зондирования и вызванной поляризации:

а – кажущееся удельное электрическое сопротивление; б – кажущаяся вызванная поляризуемость
1 – перспективные рудоконтролирующие аномальные зоны по данным электромагнитного зондирования;
2 – предполагаемые разломные зоны

Fig. 9. Distribution maps of apparent parameters obtained by electromagnetic sounding method and induced polarization:

а – apparent specific electrical resistance, б – apparent induced polarizability
1 – promising ore-controlling anomalous zones according to electromagnetic sounding data;
2 – assumed fault zones

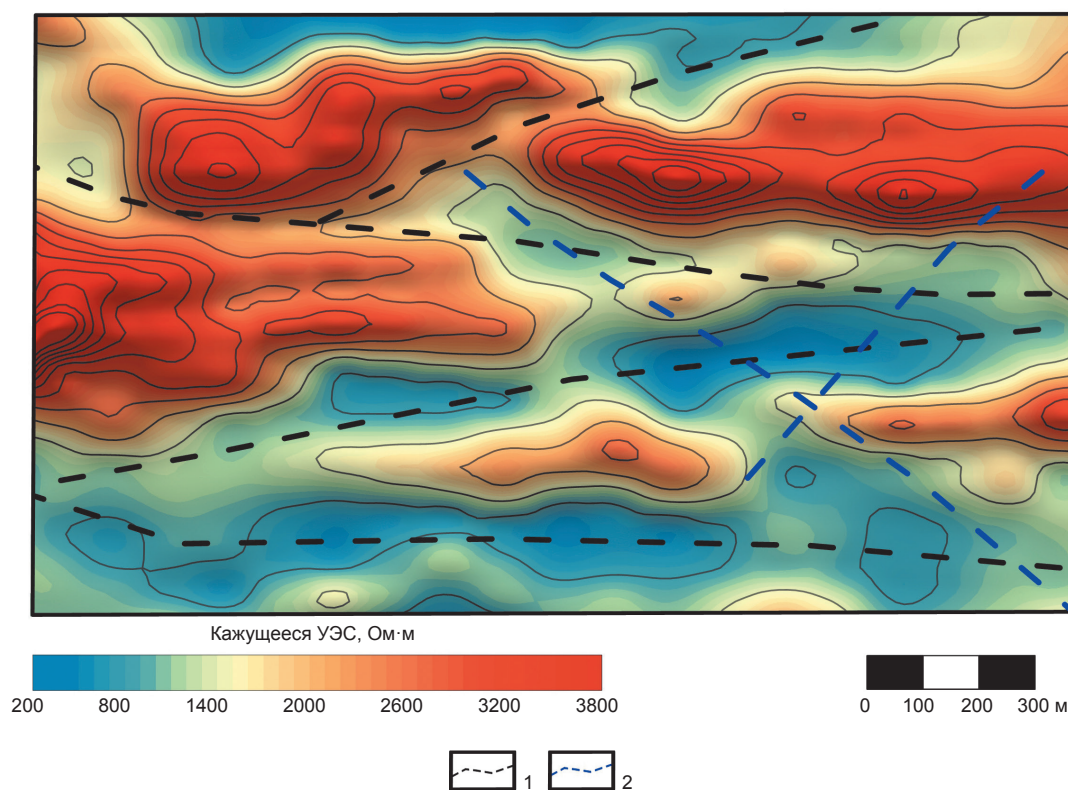


Рис. 10. Совместная интерпретация полученных электроразведочных данных:
1 – разрывные нарушения по данным, полученным методом электромагнитного зондирования и вызванной поляризации; 2 – разрывные нарушения по данным, полученным методом бесконтактного измерения электрического поля

Fig. 10. Combined interpretation of the obtained electrical exploration data:
1 – faults according to the data obtained by the electromagnetic sounding method and induced polarization;
2 – faults according to the data obtained by the non-contact electric field measurement method

Поскольку одним из ключевых параметров при поиске интрузивных массивов являлся именно параметр вызванной поляризации, он был использован для выделения перспективных зон наряду с данными магниторазведки. Это обеспечило более комплексный подход к интерпретации геологической структуры исследуемой территории.

Одним из заключительных этапов работы стала разработка схемы интерпретации, на которой были обозначены (рис. 11):

- зоны линейных аномалий, связанных с тектоническими нарушениями;
- предполагаемая граница интрузии;
- перспективные области для дальнейшего исследования.

Помимо схемы интерпретации, была выполнена трехмерная инверсия магниторазведочных данных в программе QDI Карра. Целью выполнения инверсии являлась локализация интрузивных тел в верхней части разреза (на глубину до 350 м).

В процессе выполнения каскадной инверсии магниторазведочных данных в QDI Карра в диапазоне горизонтов 215–570 м использовалась сеточная модель с размером ячеек 25×25×25 м, а верхняя часть в диапазоне 380–570 м детализировалась моделью с ячейками 12,5×12,5×12,5 м. Размеры ячеек подбираются интерпретатором, исходя из задачи и понимания геологической ситуации. Так, для решения задачи по поиску небольших тел необходимо прийти к максимально малым размерам ячеек. Если же тела имеют большие размеры, то нет смысла приходить к таким же ячейкам, которые описаны в работе (для сохранения рабочего времени).

Результаты инверсии показывают возможность выделения перспективных зон (рис. 12, 13) повышенными значениями коэффициента Кёнигсбергера, что, в свою очередь, отражает существование геологических факторов (гидротермальные процессы), повлиявших на остаточную намагниченность пород этих зон.

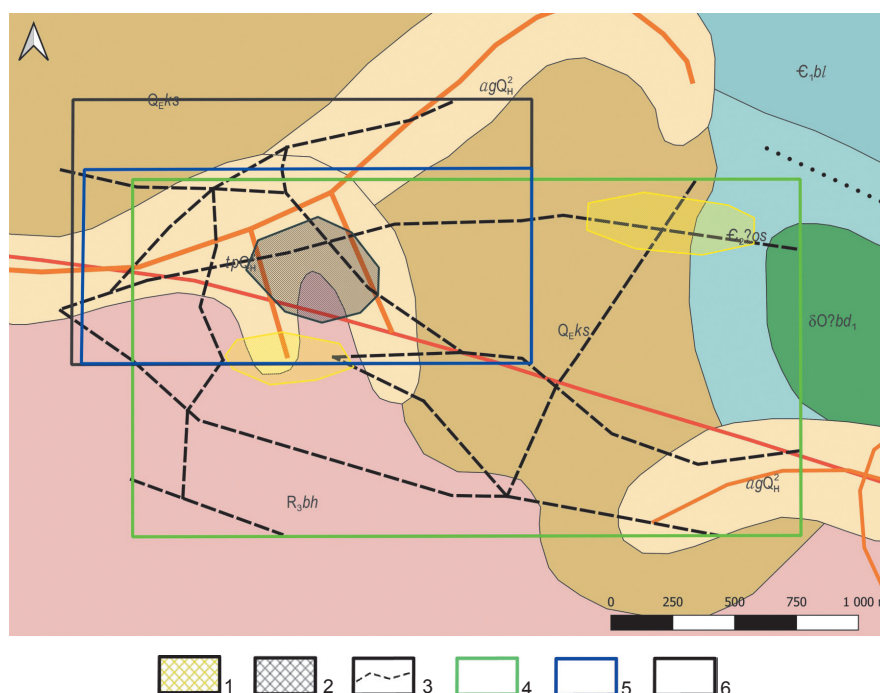


Рис. 11. Схема интерпретации геофизических данных:

1 – перспективные зоны первого порядка; 2 – перспективная зона второго порядка; 3 – выделенные разрывные нарушения на основе геофизических данных; 4 – граница беспилотной магниторазведки; 5 – граница бесконтактного измерения электрического поля; 6 – граница электромагнитного зондирования и вызванной поляризации

Fig. 11. Diagram of geophysical data interpretation:

1 – first-order promising zones; 2 – second-order promising zone; 3 – faults identified on the basis of geophysical data; 4 – unmanned magnetic exploration boundary; 5 – boundary of non-contact electric field measurement; 6 – boundary of electromagnetic sounding and induced polarization

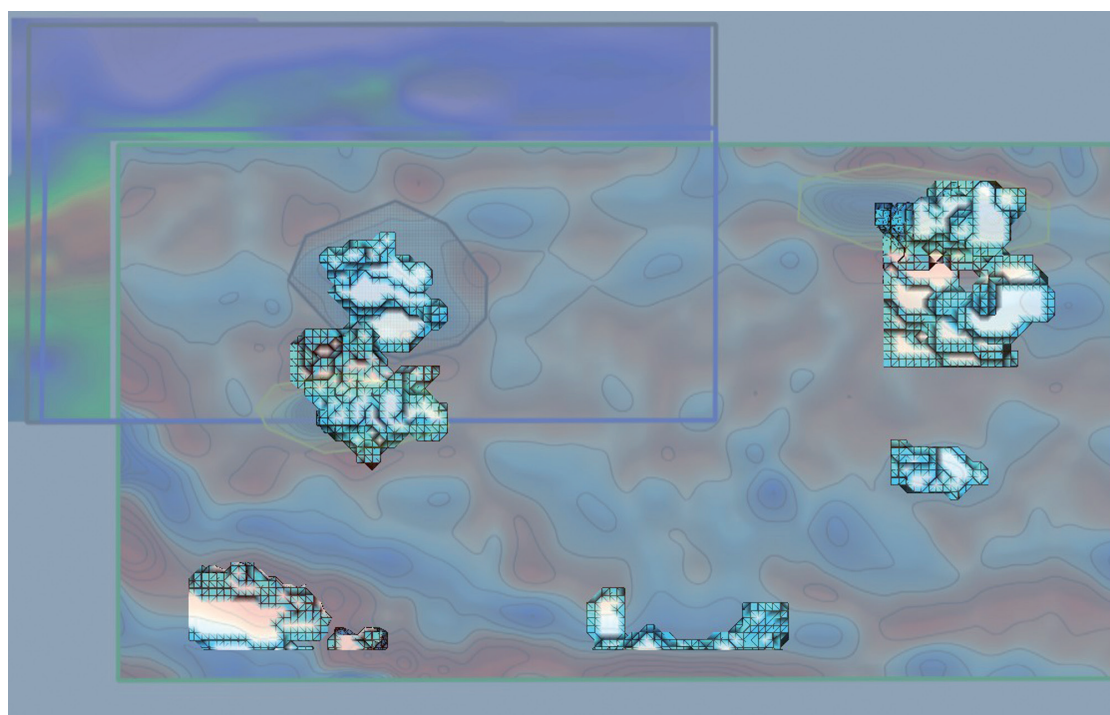


Рис. 12. Пространственные взаимоотношения повышенных значений параметра Q, полученных по результатам инверсии QDI Кappa с локальными магнитными аномалиями и рудоконтролирующими зонами

Fig. 12. Spatial relationships of elevated Q parameter values obtained from QDI Kappa inversion with local magnetic anomalies and ore-controlling zones

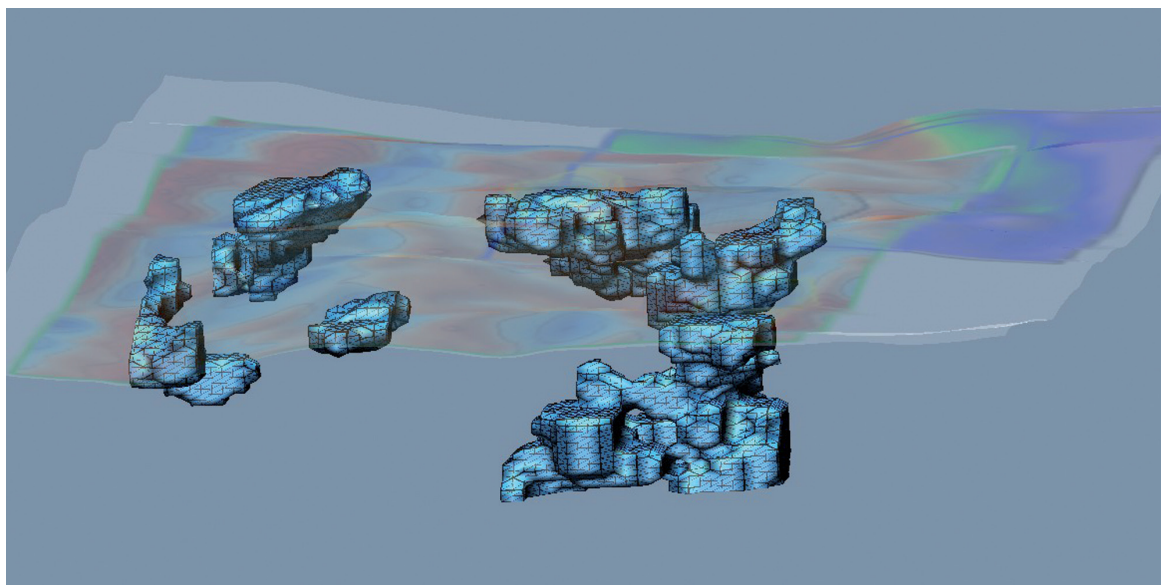


Рис. 13. Трехмерная визуализация областей повышенных значений параметра Q в сопоставлении с локальной составляющей магнитного поля

Fig. 13. Three-dimensional visualization of the areas of increased Q parameter values in comparison with the local component of the magnetic field

Трехмерная инверсия магниторазведочных данных позволила подтвердить перспективность выделенных областей (см. рис. 9) за счет локализации интрузивных тел участками повышенных значений параметра Q . Возможность подобной локализации показывает, что выполнение каскадной инверсии магнитного поля должно предшествовать выбору участков для выполнения электроразведочных работ.

Заключение

Выполненный комплекс исследований позволил определить местоположение малых диоритовых массивов Ольховского комплекса. Тем не менее для более точного установления характера залегания и параметров этих тел требуются дополнительные исследования.

Проведенная работа помогла выявить ключевые особенности строения района, связанные с тектоническими нарушениями, интрузивными телами и зонами гидротермальной метасоматозной минерализации. Полученные данные послужили основой для дальнейшей детальной разведки перспективных участков.

Представленный геофизический комплекс методов, хоть и позволил выявить все перспективные зоны на исследуемой площади, но не является окончательным. По результатам проведенных работ были сделаны следующие методические выводы:

1. На основе качественной и количественной интерпретации данных аэромагнитной съемки с использованием беспилотных летательных аппаратов были выделены предполагаемые границы интрузивного тела Ольховского комплекса, не выходящего на поверхность. В этой области отмечаются локальные аномалии с повышенными значениями магнитного поля, выявлены зоны тектонических нарушений северо-западного простирания, которые играют ключевую роль в контроле распространения большинства интрузивных тел Ольховского комплекса. Предполагается, что вдоль тектонических нарушений протягиваются линейные зоны гидротермально измененных пород, которые связаны с золотым оруденением.

2. Методы малоглубинной электроразведки, такие как БИЭП, не рекомендуются к постановке в подобных условиях ввиду малого количества полезной информации и проблем в интерпретации, связанных с массивным наличием приповерхностных обводненных зон. Несмотря на то, что такие методы быстры и недороги, геологический эффект от них минимален. Более предпочтительным в данном случае является более дорогостоящий метод электромагнитного зондирования и вызванной поляризации. При этом следует отметить, что необходимые выводы не требовали проведения инверсии. Таким образом, следует либо выполнять трехмерную инверсию электроразведочных данных, либо заменить ме-



тод электромагнитного зондирования и вызванной поляризации, позволяющий получить численную характеристику значений вызванной поляризации, на метод, который будет позволять получать лишь качественную характеристику. Это позволит уменьшить стоимость электроразведочных работ и по сравнению с выполнением дальнейшей трехмерной инверсии сократит срок проведения работ.

3. Стадийность работ и граф обработки должна быть следующей:

1) проведение анализа геологической и геофизической информации с последующей беспилотной магниторазведкой;

2) выполнение беспилотных магниторазведочных работ, дальнейшая трехмерная каскадная инверсия данных и интерпретация данных, выделение перспективных областей с

положительным знаком в локальной составляющей поля и положительным параметром Q , помимо выделения областей, требуется выделить разломы (данный этап является основополагающим для дальнейшей постановки электроразведочных работ, так как именно на основе полученных данных выбирается будующая площадь для выполнения электроразведки);

3) выполнение электроразведочных работ и проведение совместного геофизического анализа с получением результатов магниторазведки, выделение областей с повышенной вызванной поляризацией и разрывными нарушениями;

4) построение схемы интерпретации геофизических работ для дальнейшего изучения перспективных областей.

Список источников

1. Ерофеев Л.Я., Орехов А.Н. Геолого-геофизические условия на золоторудных полях Сибири // Известия Томского политехнического университета. 2014. Т. 324. № 1. С. 80–86. EDN: RWQLIZ.
2. Гусев А.И. Геолого-генетическая модель Синюхинского золото-медно-скарнового месторождения // Поиски и разведка месторождений полезных ископаемых: материалы науч. конф. Томск: Изд-во ТПУ, 2000. С. 104–108.
3. Соловьев Г.А. Петрофизическая классификация рудных месторождений // Геология и разведка. 1991. № 6. С. 22–29.
4. Ерофеев Л.Я., Орехов А.Н. Магнито-геологические модели золоторудных тел и возможности магнитометрии при их разведке // Минералогия Северо-Восточной Азии: материалы II Всеросс. науч.-практ. конф. Улан-Удэ: Экос, 2011. С. 46–47.
5. Приходько А.Ю. Условия формирования золоторудных месторождений по геофизическим данным // Геофизические исследования на твердые полезные ископаемые: тезисы докладов Междунар. геофизической конф. (г. Санкт-Петербург, 2–6 октября 2006 г.). СПб.: Издательство Welcome, 2006. С. 284–285.
6. Чупров В.В. [и др.]. Геолого-геофизическая классификация рудных объектов при общих и детальном поисках // Советская геология. 1982. № 4. С. 24–28.
7. Паршин А.В., Будяк А.Е., Блинов А.В., Костерев А.Н., Морозов В.А., Михалев А.О. [и др.]. Низковысотная беспилотная аэромагниторазведка в решении задач крупномасштабного структурно-геологического картирования и поисков рудных месторождений в сложных ландшафтных условиях. Часть 2 // География и природные ресурсы. 2016. № S6. С. 150–155. [https://doi.org/10.21782/GIPR0206-1619-2016-6\(150-155\)](https://doi.org/10.21782/GIPR0206-1619-2016-6(150-155)). EDN: XQRZBR.
8. Паршин А.В., Гребенкин Н.А., Морозов В.А., Ржевская А.К., Шикаленко Ф.Н. Первые результаты методических работ по применению беспилотных аэрогеофизических технологий на стадии поисков месторождений Урана // Разведка и охрана недр. 2017. № 11. С. 59–64. EDN: YTHJUE.
9. Снегирёв Н.В., Гаченко С.В., Паршин А.В. Сравнительный анализ информативности маловысотной магниторазведки с применением беспилотных летательных аппаратов и наземной магниторазведки // Науки о Земле и недропользование. 2023. Т. 46. № 2. С. 182–189. <https://doi.org/10.21285/2686-9993-2023-46-2-182-189>. EDN: CLAMAG.
10. Сапунов В.А., Денисов А.Ю., Савельев В.В., Киселёв С.Е., Нархов Е.Д., Сергеев А.В. [и др.]. Модернизация наземных оверхаузеровских магнитометров POS для использования на беспилотных аэронавигаторах коптерного типа // Инженерная и рудная геофизика 2020: материалы 16-й науч.-практ. конф. совместно с семинаром «Инженерная и рудная геология 2020» (г. Пермь, 14–18 сентября 2020 г.). Пермь: ЕАГЕ «Геомодель», 2020. С. 99. <https://doi.org/10.3997/2214-4609.202051124>. EDN: DQTTXQ.
11. Sapunov V., Bondarev E., Denisov A., Narkhov E., Sergeev A., Fedorov A., et al. UAV overhauser sensors and magnetometers: results and development prospects // Developments and Advances in Defense and Security. Proceedings of MICRADS 2024 / eds Á. Rocha, A. Vaseashta. Springer, 2025. Vol. 423. P. 331–345.
12. Parshin A.V., Tsirel V.S., Rzhetskaya A.K. Guidelines for low-altitude aeromagnetic surveys (Russian Federal Agency for Subsoil Use, 2018) – the main points and the authors' comments // GeoBaikal 2018: conference materials (Irkutsk, 11–17 August 2018). European Association of Geoscientists & Engineers, 2018. P. 1–7. <https://doi.org/10.3997/2214-4609.201802012>.
13. Давыденко А.Ю. Определение остаточной и индуктивной намагниченности объектов на основе каскадной инверсии данных магнитных съемок // Вопросы теории и практики геологической интерпретации гравитаци-



онных магнитных и электрических полей: сборник науч. трудов. Пермь: Изд-во ГИ УроРАН, 2025. Вып. 1. С. 95–99. EDN: XTVUJG.

14. Давыденко А.Ю. Инверсия магнитного поля на основе эластичной сети и векторного сканирования для оценки магнитной восприимчивости и остаточной намагниченности трехмерных объектов // Вопросы теории и практики геологической интерпретации геофизических полей: материалы 47-й сессии Междунар. науч. семинара Д.Г. Успенского – В.Н. Страхова (г. Воронеж, 27–30 января 2020 г.). Воронеж: ИПЦ «Научная книга», 2020. С. 105–110. EDN: SSQCEL.

15. Zou H., Hastie T. Regularization and variable selection via the elastic net // *Journal of the Royal Statistical Society B. (Statistical Methodology)*. 2005. Vol. 67. Iss. 2. 301–320. <https://doi.org/10.1111/j.1467-9868.2005.00503.x>.

16. Бобачев А.А. Особенности электрического поля в воздухе при низкочастотных бесконтактных электрических зондированиях // *Разведка и охрана недр*. 2002. № 10. С. 36–40.

17. Груздев А.И., Бобачев А.А. Особенности применения бесконтактных измерений в методе сопротивлений // *Инженерная, угольная и рудная геофизика-2015. Современное состояние и перспективы развития: материалы конф. (г. Сочи, 28 сентября – 2 октября 2015 г.)*. М.: Изд-во ЕАГО, 2015. С. 178–183. EDN: UMRFSR.

18. Груздев А.И. Сравнение различных методик контактных и бесконтактных измерений в условиях средней полосы России // *Инженерные изыскания*. 2014. № 9-10. С. 32–37. EDN: TEGEUV.

19. Трофимов И.В., Башкеев А.С., Савченко В.А., Коншин И.О. Опыт комплексирования бесконтактной технологии метода сопротивлений и геофизической съемки с применением беспилотных летательных аппаратов при поисках коренного золота в Бодайбинском синклинии // *Науки о Земле и недропользование*. 2024. Т. 47. № 3. С. 248–261. <https://doi.org/10.21285/2686-9993-2024-47-3-248-261>. EDN: PQZKDA

20. Пат. № 2574861, Российская Федерация, G01V 3/08. Способ измерения и обработки переходных процессов с заземленной линией при импульсном возбуждении поля электрическим диполем с целью построения геоэлектрических разрезов и устройство для осуществления этого способа с помощью аппаратно-программного электроразведочного комплекса (АПЭК «МАРС») / Ю.А. Давыденко, А.Ю. Давыденко, И.Ю. Пестерев, С.В. Яковлев, М.А. Давыденко, А.В. Комягин [и др.]. Заявл. 01.08.2012; опубл. 10.02.2016. Бюл. № 4.

References

1. Erofeev L.Ya., Orekhov A.N. Geological and geophysical conditions at Siberian golden ore fields. *Bulletin of the Tomsk Polytechnic University*. 2014;324(1):80-86. (In Russ.). EDN: RWQLIZ.

2. Gusev A.I. Geological and genetic model of the Sinyukhinsky gold-copper-skarn deposit. In: *Poiski i razvedka mestorozhdenii poleznykh iskopaemykh: materialy nauch. konf. = Prospecting and exploration of mineral deposits: Proceedings of the scientific conference*. Tomsk: Tomsk Polytechnic University; 2000, p. 104-108. (In Russ.).

3. Soloviev G.A. Petrophysical classification of ore deposits. *Geologiya i razvedka*. 1991;6:22-29. (In Russ.).

4. Erofeev L.Ya., Orekhov A.N. Magnetogeological models of gold ore bodies and magnetometry potential in their exploration. In: *Minerageniya Severo-Vostochnoi Azii: materialy II Vseross. nauch.-prakt. konf. = Minerageny of North-East Asia: proceedings of the 2nd All-Russian scientific and practical conference*. Ulan-Ude: Ekos; 2011, p. 46-47. (In Russ.).

5. Prihod'ko A.Yu. Formation conditions of gold ore deposits according to geophysical data. In: *Geofizicheskie issledovaniya na tverdye poleznye iskopaemye: tezisy dokladov Mezhdunar. geofizicheskoi konf. = Geophysical research for solid minerals: abstracts of the International geophysical conference*. 2–6 October 2006, St. Petersburg. St. Petersburg: Izdatel'stvo Welcome; 2006, p. 284-285. (In Russ.).

6. Chuprov V.V., et al. Geological and geophysical classification of ore objects in general and detailed exploration. *Sovetskaya geologiya*. 1982;4:24-28. (In Russ.).

7. Parshin A.V., Bydyak A.E., Blinov A.V., Kosterev A.N., Morozov V.A., Mikhalev A.O., et al. Low-altitude unmanned aeromagnetic survey in management of large-scale structuralgeological mapping and prospecting for ore deposits in composite topography. Part 2. *Geografya i prirodnye resursy*. 2016;S6:150-155. (In Russ.). [https://doi.org/10.21782/GIPR0206-1619-2016-6\(150-155\)](https://doi.org/10.21782/GIPR0206-1619-2016-6(150-155)). EDN: XQRZBR.

8. Parshin A.V., Grebenkin N.A., Morozov V.A., Rzhetskaya A.K., Shikalenko F.N. The first results of methodological work on the application of bespilot airborne geophysical technologies at the stage of prospecting of uranium deposits. *Prospect and protection of mineral resources*. 2017;11:59-64. (In Russ.). EDN: YTHJUE.

9. Snegirev N.V., Gachenko S.V., Parshin A.V. Comparative analysis of low-altitude magnetic survey sensitivity using unmanned aerial vehicles and land magnetic survey. *Earth sciences and subsoil use*. 2023;46(2):182-189. (In Russ.). <https://doi.org/10.21285/2686-9993-2023-46-2-182-189>. EDN: CLAMAG.

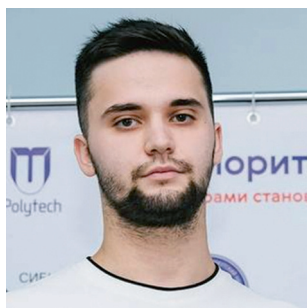
10. Sapunov V.A., Denisov A.Y., Savelyev V.V., Kiselev S.E., Narkhov E.D., Sergeev A.V., et al. Modernization of ground-based overhauser POS magnetometers to use on small unmanned copter-type aerial vehicles. In: *Inzhenernaya i rudnaya geofizika 2020: materialy 16-i nauch.-prakt. konf. sovmestno s seminarom «Inzhenernaya i rudnaya geologiya 2020» = Engineering and ore geophysics 2020: proceedings of the 16th scientific and practical conference in combination with the seminar “Engineering and Ore Geology 2020”*. 14–18 September 2020, Perm. Perm: Geomodel; 2020, p. 99. (In Russ.). <https://doi.org/10.3997/2214-4609.202051124>. EDN: DQTTXQ.

11. Sapunov V., Bondarev E., Denisov A., Narkhov E., Sergeev A., Fedorov A., et al. UAV overhauser sensors and magnetometers: results and development prospects. In: Rocha Á., Vaseashta A. (eds). *Developments and Advances in Defense and Security. Proceedings of MICRADS 2024*. Springer; 2025, vol. 423, p. 331-345.



12. Parshin A.V., Tsirel V.S., Rzhetskaya A.K. Guidelines for low-altitude aeromagnetic surveys (Russian Federal Agency for Subsoil Use, 2018) – the main points and the authors' comments. In: *GeoBaikal 2018: conference materials*. 11–17 August 2018, Irkutsk. European Association of Geoscientists & Engineers; 2018, p. 1-7. <https://doi.org/10.3997/2214-4609.201802012>.
13. Davydenko A.Yu. Determination of residual and inductive magnetization of objects based on cascade inversion of magnetic survey data. In: *Theoretical and Practical Issues of Geological Interpretation of Gravitational Magnetic and Electric Fields: Collected scientific papers*. Perm: Ural Branch of the Russian Academy of Sciences, Mining Institute; 2025, vol. 1, p. 95-99. (In Russ.). EDN: XTVUJG.
14. Davydenko A.Yu. Magnetic field inversion based on elastic net and vector scanning to estimate 3D object magnetic susceptibility and remanent magnetization. In: *Materialy 47-i sessii Mezhdunar. nauch. seminarov D.G. Uspenskogo – V.N. Strakhova = Materials of the 47th session of D.G. Uspensky – V.N. Strakhov International scientific seminar*. 27–30 January 2020, Voronezh. Voronezh: Nauchnaya kniga; 2020, p. 105-110. (In Russ.). EDN: SSQCEL.
15. Zou H., Hastie T. Regularization and variable selection via the elastic net. *Journal of the Royal Statistical Society B (Statistical Methodology)*. 2005;67(2):301-320. (In Russ.). <https://doi.org/10.1111/j.1467-9868.2005.00503.x>.
16. Bobachev A.A. Electric field features in the air during low-frequency contactless electrical sounding. *Prospect and protection of mineral resources*. 2002;10:36-40. (In Russ.).
17. Gruzdev A.I., Bobachev A.A. Application features of non-contact measurements in resistance method. In: *Inzhenernaya, ugol'naya i rudnaya geofizika-2015. Sovremennoe sostoyanie i perspektivy razvitiya: materialy konf. = Engineering, coal and ore geophysics-2015. Current status and development prospects: conference proceedings*. 28 September – 2 October 2015, Sochi. Moscow: Interregional Public Organization Euro-Asian Geophysical Society; 2015, p. 178-183. (In Russ.). EDN: UMRFSR.
18. Gruzdev A.I. Comparison of different methods of contact and non-contact measurements in the midland of Russia. *Engineering Survey*. 2014;9-10:32-37. (In Russ.). EDN: TEGEUV.
19. Trofimov I.V., Bashkeev A.S., Savchenko V.A., Konshin I.O. Integration experience of resistivity method contactless technology and unmanned aerial vehicle measurements in primary gold prospecting in Bodaibo synclinorium. *Earth sciences and subsoil use*. 2024;47(3):248-261. (In Russ.). <https://doi.org/10.21285/2686-9993-2024-47-3-248-261>. EDN: PQZKDA.
20. Davydenko J.A., Davydenko A.J., Pesterev I.J., Jakovlev S.V., Davydenko M.A., Komjagin A.V., et al. *Method of measuring and processing transient processes with grounded line during pulse field excitation with electric dipole to construct geoelectric sections and apparatus for carrying out said method using hardware-software electrical logging system (АРЕК «МАРС»)*. Patent RF, no. 2574861; 2016. (In Russ.).

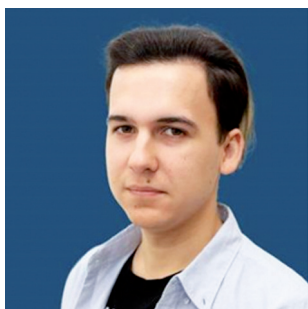
Информация об авторах / Information about the authors



Трофимов Илья Владимирович,
младший научный сотрудник,
институт «Сибирская школа Геонаук»
Иркутский национальный исследовательский технический университет,
г. Иркутск, Россия,
✉ itrofimov@geo.istu.edu
<https://orcid.org/0009-0008-3888-5779>
Ilya V. Trofimov,
Junior Researcher,
Siberian School of Geosciences,
Irkutsk National Research Technical University,
Irkutsk, Russia,
✉ itrofimov@geo.istu.edu
<https://orcid.org/0009-0008-3888-5779>



Валькова Евгения Денисовна,
инженер департамента геоинформатики,
институт «Сибирская школа геонаук»,
Иркутский национальный исследовательский технический университет,
г. Иркутск, Россия,
✉ evalkova@geo.istu.edu
<https://orcid.org/0009-0007-7394-1978>
Evgeniya D. Valkova,
Engineer of the Geoinformatics Department,
Siberian School of Geosciences,
Irkutsk National Research Technical University,
Irkutsk, Russia,
✉ evalkova@geo.istu.edu
<https://orcid.org/0009-0007-7394-1978>



Лазурченко Антон Витальевич,
младший научный сотрудник департамента геофизики,
институт «Сибирская школа геонаук»,
Иркутский национальный исследовательский технический университет,
г. Иркутск, Россия,
alazurchenko@geo.istu.edu
<https://orcid.org/0009-0000-2806-1954>

Anton V. Lazurchenko,
Junior Researcher of the Geophysics Department,
Siberian School of Geosciences,
Irkutsk National Research Technical University,
Irkutsk, Russia,
alazurchenko@geo.istu.edu
<https://orcid.org/0009-0000-2806-1954>



Степанов Александр Петрович,
ведущий инженер департамента геоинформатики,
институт «Сибирская школа геонаук»,
Иркутский национальный исследовательский технический университет,
г. Иркутск, Россия,
stepanovap@geo.istu.edu
<https://orcid.org/0009-0000-5271-1128>

Aleksandr P. Stepanov,
Lead Engineer of the Geoinformatics Department,
Siberian School of Geosciences,
Irkutsk National Research Technical University,
Irkutsk, Russia,
stepanovap@geo.istu.edu
<https://orcid.org/0009-0000-5271-1128>



Давыденко Александр Юрьевич,
доктор физико-математических наук,
профессор департамента геофизики,
институт «Сибирская школа геонаук»,
Иркутский национальный исследовательский технический университет,
г. Иркутск, Россия,
профессор кафедры динамической геологии,
Иркутский государственный университет,
г. Иркутск, Россия,
davydenko@gmail.com
<https://orcid.org/0000-0002-1751-6682>

Aleksandr Yu. Davydenko,
Dr. Sci. (Phys. & Math.),
Professor of the Geophysics Department,
Siberian School of Geosciences,
Irkutsk National Research Technical University,
Irkutsk, Russia,
Professor of the Department of Dynamic Geology,
Irkutsk State University,
Irkutsk, Russia,
davydenko@gmail.com
<https://orcid.org/0000-0002-1751-6682>

Вклад авторов / Contribution of the authors

И.В. Трофимов – разработка концепции, обработка данных, редактирование рукописи.
Е.Д. Валькова – написание черновика рукописи.
А.В. Лазурченко – визуализация, обработка данных.
А.П. Степанов – курирование данных.
А.Ю. Давыденко – проведение исследования.
Ilya V. Trofimov – conceptualization, data analysis, writing – editing.
Evgeniya D. Valkova – writing – original draft.
Anton V. Lazurchenko – visualization, data analysis.
Aleksandr P. Stepanov – data curation.
Aleksandr Yu. Davydenko – investigation.



Конфликт интересов / Conflict of interests

Авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов.
The authors declare no conflict of interests.

Все авторы прочитали и одобрили окончательный вариант рукописи.
The final manuscript has been read and approved by all the co-authors.

Информация о статье / Information about the article

Статья поступила в редакцию 27.03.2025; одобрена после рецензирования 14.05.2025; принята к публикации 27.05.2025.

The article was submitted 27.03.2025; approved after reviewing 14.05.2025; accepted for publication 27.05.2025.

ГОРНОПРОМЫШЛЕННАЯ И НЕФТЕГАЗОПРОМЫСЛОВАЯ ГЕОЛОГИЯ,
ГЕОФИЗИКА, МАРКШЕЙДЕРСКОЕ ДЕЛО И ГЕОМЕТРИЯ НЕДР

Научная статья

УДК 556.3+556.5

EDN: FXZJSX

DOI: 10.21285/2686-9993-2025-48-2-224-236

Условия формирования природных вод в долине реки Янцзы
и на прилегающих территориях (Китай)А.А. Сумкин^{a,✉}, Ч. Чэнь^b, Я.С. Гнатюк^c, Л.И. Аузина^d, Ю. Чжан^e^{a,c,d}Иркутский национальный исследовательский технический университет, Иркутск, Россия^bНанкинский педагогический университет, Нанкин, Китай^eНанкинский университет, Нанкин, Китай

Резюме. Целью исследования являлось изучение условий формирования природных вод восточной части Южно-Китайской платформы в зоне влияния субдукции под воздействием эндогенных и экзогенных процессов природного и техногенного генезисов. Полученный в ходе проведенной работы материал позволяет проанализировать структуру хозяйственно-питьевого водоснабжения в восточных регионах Китая, доступность и качество водных ресурсов. Актуальность исследования заключается в том, что в настоящее время страна испытывает острый дефицит пресной воды, который обусловлен рядом причин, в том числе экономическим ростом, индустриализацией, развитием городов, интенсивным (часто нерегулируемым) использованием водных ресурсов в сельском хозяйстве и промышленности разного типа, а также загрязнением, вызванным чрезмерной эвтрофикацией. Одним из путей решения проблемы водоснабжения являются осмысление условий формирования природных вод и анализ динамики режимобразующих факторов, которые включают в себя природно-климатические, геолого-структурные, техногенные характеристики, определяющие различные элементы водного баланса региона. На основе структурно-гидрогеологического анализа предложены рекомендации, направленные на оптимизацию структуры водоснабжения, рациональное использование поверхностных и подземных вод. Результаты проведенного анализа могут являться основой для дальнейших исследований, имеющих своей целью разработку эффективной стратегии управления водными ресурсами провинций Цзянсу, Аньхой, Чжецзян.

Ключевые слова: Китай, водоснабжение, подземные воды, поверхностные воды, структурно-гидрогеологическое районирование

Для цитирования: Сумкин А.А., Чэнь Ч., Гнатюк Я.С., Аузина Л.И., Чжан Ю. Условия формирования природных вод в долине реки Янцзы и на прилегающих территориях (Китай) // Науки о Земле и недропользование. 2025. Т. 48. № 2. С. 224–236. <https://doi.org/10.21285/2686-9993-2025-48-2-224-236>. EDN: FXZJSX.

APPLIED MINING AND PETROLEUM FIELD GEOLOGY,
GEOPHYSICS, MINE SURVEYING AND SUBSOIL GEOMETRY

Original article

Formation conditions of natural waters in the Yangtze river valley
and its adjacent territories, ChinaAndrei A. Sumkin^{a,✉}, Zhangchi Chen^b, Iana S. Gnatyuk^c, Larisa I. Auzina^d, Yongzhan Zhang^e^{a,c,d}Irkutsk National Research Technical University, Irkutsk, Russia^bNanjing Normal University, Nanjing, China^eNanjing University, Nanjing, China

Abstract. The purpose of the research is to study the formation conditions of natural waters of the eastern part of the South China Platform in the subduction influence zone under the effect of endogenous and exogenous processes of natural and man-made genesis. The material obtained during the study enables the analysis of the structure of domestic drinking water supply in the eastern regions of China as well as the availability and quality of water resources. The relevance of the study is determined by the fact that the country is currently suffering an acute shortage of fresh water, which is caused by a number of reasons, including economic growth, industrialization, urban development, intensive (often uncontrolled) use of water resources in agriculture and industry of various types, as well as pollution caused by excessive eutrophication.



One of the solutions of the water supply problem is understanding of the formation conditions of natural waters and analysis of the dynamics of regime-forming factors. The latter include natural, climatic, geological, structural, and man-made characteristics that determine various elements of the regional water balance. Based on the structural and hydrogeological analysis, recommendations are proposed in order to optimize the structure of water supply and provide rational use of surface and groundwater. The results of the conducted analysis can serve the basis for further research aimed at developing an effective water resources management strategy in Jiangsu, Anhui, and Zhejiang provinces.

Keywords: China, water supply, groundwater, surface water, structural-hydrogeological zoning

For citation: Sumkin A.A., Chen Zh., Gnatyuk I.S., Auzina I.L., Zhang Y. Formation conditions of natural waters in the Yangtze river valley and its adjacent territories, China. *Earth sciences and subsoil use*. 2025;48(2):224-236. (In Russ.). <https://doi.org/10.21285/2686-9993-2025-48-2-224-236>. EDN: FXZJSX.

Введение

26 октября – 9 ноября 2024 г. состоялась международная научно-практическая экспедиция с участием студентов и сотрудников Нанкинского университета (Китай) и института «Сибирская школа геонаук» Иркутского национального исследовательского технического университета (Россия). Работы проводились в восточной части Китая, охватывая дельту реки Янцзы и прилегающие территории. Общая протяженность пути составила 1165 км, было пройдено 14 маршрутов. Исследование включало 42 точки наблюдения. Объектами стали вулканические структуры, реки, озера, водохранилища, источники подземных вод (ПВ) различной температуры и состава, гравитаци-

онные процессы (осыпи, оползни), карстовые образования, высокогорные зоны трещиноватости экзогенного и тектонического генезиса.

Одним из основных объектов исследования явились природные воды (21 точка наблюдения) (рис. 1), формирование которых тесно связано с эндогенными и экзогенными процессами природного и техногенного характера, протекающими в юго-восточной части Южно-Китайского кратона в зоне влияния субдукции. Полученный в процессе экспедиции, а также из архивных и литературных источников материал позволил проанализировать структуру хозяйственно-питьевого водоснабжения в восточных регионах Китая, доступность и качество водных ресурсов.

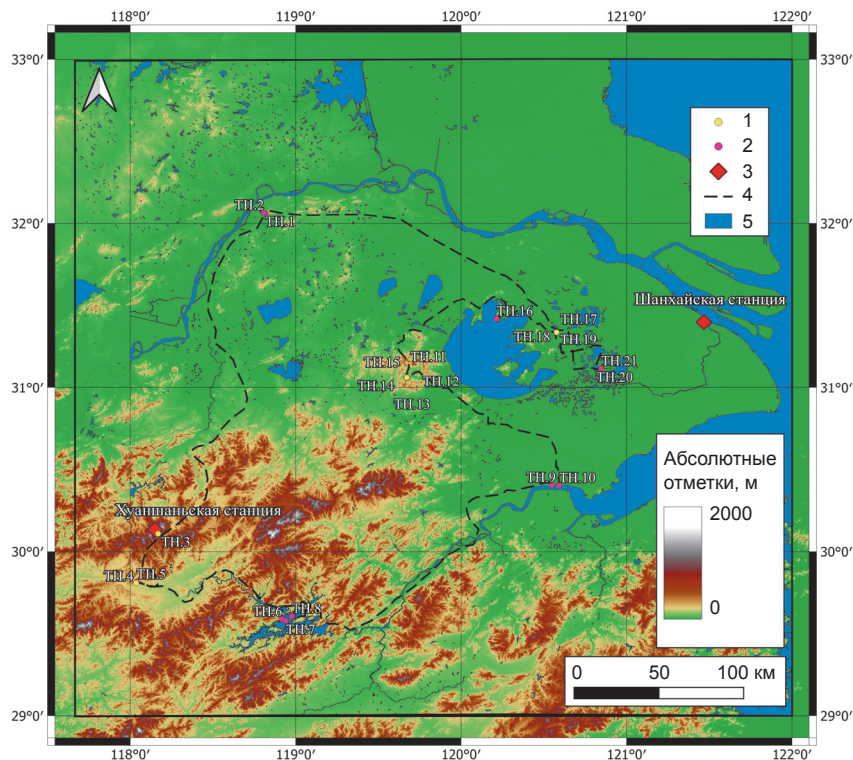


Рис. 1. Карта фактического материала исследования:

1 – мониторинговые станции; 2 – точки отбора проб подземных вод; 3 – точки отбора проб поверхностных вод; 4 – абрис движения экспедиции; 5 – водные объекты

Fig. 1. Map of actual research material:

1 – monitoring stations; 2 – groundwater sampling points; 3 – surface water sampling points; 4 – expedition route outline; 5 – water bodies



Целью исследования являлось изучение условий формирования природных вод восточной части Южно-Китайского платформу с последующей оценкой структуры хозяйственно-питьевого водоснабжения некоторых регионов восточной части Китая, находящихся в различных геолого-структурных условиях. Это связано с тем, что в настоящее время страна испытывает острый дефицит пресной воды [1], обусловленный рядом причин, в том числе экономическим ростом, индустриализацией, развитием городов [2, 3], интенсивным, часто нерегулируемым, использованием водных ресурсов в сельском хозяйстве и промышленности, а также загрязнением, вызванным чрезмерной эвтрофикацией [4].

Одной из причин нехватки воды является истощение водных ресурсов преимущественно из-за интенсивной урбанизации. В 2023 г. в городах Китая проживало около 66,2 % от общего числа населения. В 400 городах (на 2022 г.) недостаточно воды необходимого качества, в крупных городах на 1 человека приходится менее 500 м³/год, то есть меньше критического показателя, установленного Всемирным водным конгрессом в 1977 г. К примеру, в Пекине этот показатель составляет 128 м³/чел, в Тяньцзыне – 105 м³/чел в год [5].

Еще одна причина водного дефицита – это нерациональное использование и чрезмерная эксплуатация ПВ. В конце прошлого века в целях хозяйственно-питьевого водоснабжения за счет ПВ на востоке Китая одновременно эксплуатировалось около 2 млн скважин, при этом уровень ПВ на территории Шанхая снизился на 20 м, воронка депрессии достигла океана, началась инфильтрация соленых вод Тихого океана в водоносные горизонты, которые используются для хозяйственно-питьевого водоснабжения¹. Поверхность в некоторых местах города начала проседать [6].

В 2021 г. Министерство водных ресурсов Китая выделило более 150 зон с чрезмерной эксплуатацией водных ресурсов (Хэбэй, Шаньдун, Хэнань, Синьцзян и др.). К 2030 г. правительство страны предусматривает снижение потребления воды на 5 %². Не менее важным фактором, определившим ограниченность водных ресурсов, является их загрязнение. Водные ресурсы Китая составляют 2876,1 млрд м³, из них более 70 % поверхностных вод, являю-

щихся основным источником водоснабжения, на большей части восточных территорий Китая загрязнены. Годовой сброс в значительной степени неочищенных стоков составляет 63,1 млрд м³/год (86,7 % – результат сельскохозяйственной деятельности, при которой используются химические удобрения, пестициды и другие ядохимикаты) [5]. Существенный вклад вносят предприятия химической, целлюлозно-бумажной, текстильной, угольной промышленности, расположенные в долинах крупных рек в том числе Янцзы (рис. 2). Качество воды на многих водных объектах Китая достигло 4 и 5 степеней загрязнения, при которых водоем утрачивает свою биосферную функцию [5].

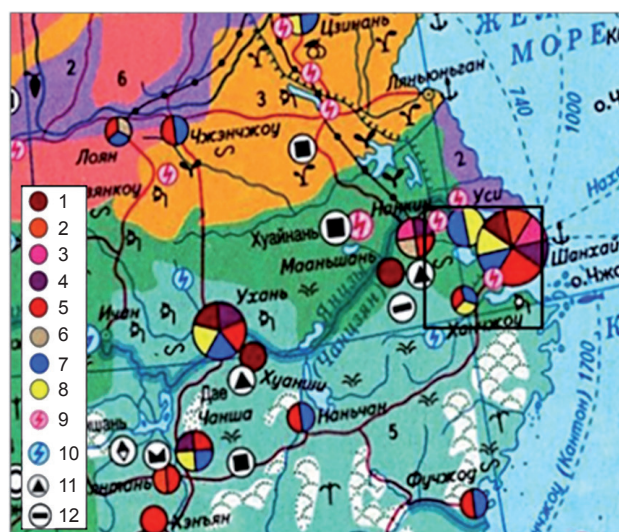


Рис. 2. Обзорная карта расположения наиболее крупных промышленных городов в долине реки Янцзы:

- 1 – черная металлургия; 2 – цветная металлургия;
- 3 – нефтеперерабатывающая промышленность;
- 4 – химическая промышленность;
- 5 – машиностроение и металлообработка;
- 6 – промышленность строительных материалов;
- 7 – текстильная промышленность;
- 8 – пищевая промышленность;
- 9 – тепловые электростанции;
- 10 – гидроэлектростанции;
- 11 – железорудная промышленность;
- 12 – медная промышленность

Fig. 2. Overview map of the location of the largest industrial cities in the Yangtze river valley:

- 1 – ferrous metallurgy; 2 – non-ferrous metallurgy;
- 3 – oil refining industry; 4 – chemical industry;
- 5 – mechanical engineering and metalworking;
- 6 – building materials industry; 7 – textile industry;
- 8 – food industry; 9 – thermal power plants;
- 10 – hydroelectric power plants; 11 – iron ore industry;
- 12 – copper industry

¹ Водное хозяйство Китайской Народной Республики: информационный сборник. Ташкент: Изд-во НИЦ МКВК, 2013. № 37. 64 с.

² Лю Цин. Механизм формирования и перспективы развития водного рынка: дис. ... канд. экон. наук: 08.00.05. М., 2015. 156 с.



При этом контроль за использованием водных ресурсов затруднен, поскольку он осуществляется различными государственными департаментами, в частности, за загрязнение воды отвечают природоохранные органы, структура водоснабжения входит в зону ответственности Министерства водного хозяйства, очисткой сточных вод занимается Министерство строительства, регулирование использования ПВ находится в ведении Министерства земель и ресурсов.

Материалы и методы исследования

Исходные данные были получены в процессе экспедиционных работ при гидрогеологических замерах и опробовании ПВ и поверхностных вод с использованием портативного прибора ProQuatro. Суммарный объем опробования включал в себя 21 объект, в том числе реки, озера, выходы ПВ.

В процессе проведения исследования был проработан значительный объем архивных и литературных источников, содержащих также средневековые данные о количестве атмосферных осадков, полученные на метеорологических станциях Шанхай и Хуаншань, а также на геопортале Китайской геологической службы (англ.: China Geological Survey). Визуализация

исходных данных проводилась с использованием программного комплекса QGIS 3.14.

Результаты исследования и их обсуждение

В процессе обработки исходной информации были выделены основные факторы, определяющие условия формирования и распределения ПВ и поверхностных вод: неотектоническое развитие региона, рельеф, плотность речной сети, геологическое строение, климатические показатели (величины атмосферных осадков, температуры, испарения).

Наиболее значимое влияние на формирование природных условий Восточного Китая, включая водные ресурсы, оказали структурно-тектонические особенности территории, обусловленные ее приуроченностью к восточной части Южно-Китайского блока. Формирование восточной части Китая произошло в результате коллизии Индо-Австралийской и Евразийской плит, начавшейся в палеогене и продолжающейся до настоящего времени, которая привела к деформации верхней части земной коры и образованию основных тектонических и геоморфологических элементов исследуемой территории (см. рис. 2) [7]. Район проведения работ охватывал кратон Янцзы и блок Катайзия, граница между которыми фиксируется разломом Цзян-Шао (рис. 3).

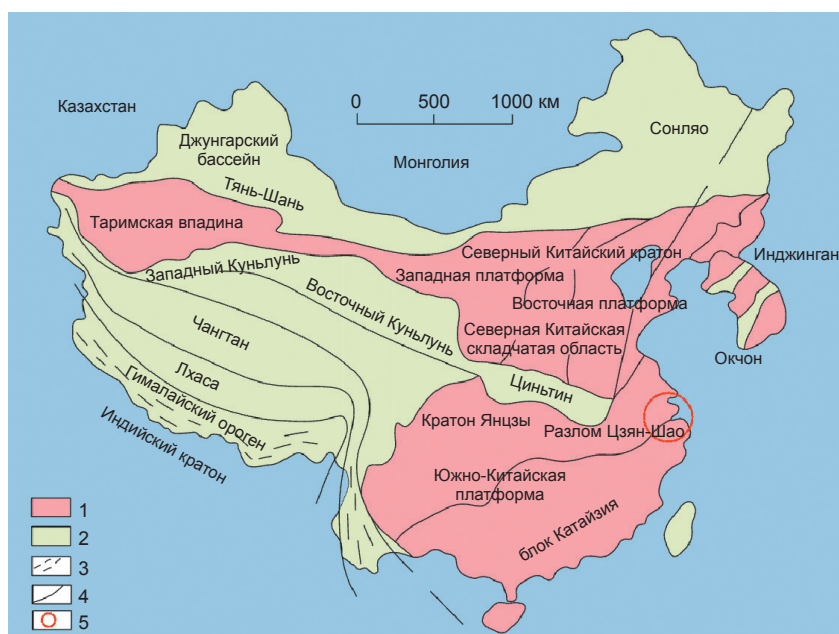


Рис. 3. Схематическая структурно-тектоническая карта Китая [8]:

1 – докембрийская кратоническая плита; 2 – фанерозойская складчатая область; 3 – структурные зоны;
4 – основной разлом; 5 – контур исследуемой площади

Fig. 3. Schematic structural-tectonic map of China [8]:

1 – Pre-Cambrian cratonic plate; 2 – Phanerozoic folded area; 3 – structural zones; 4 – main fault;
5 – outline of the area under investigation



Мегаформы рельефа восточной части Китая преимущественно представляют собой два типа: равнину среднего и нижнего течения реки Янцзы (южная часть Великой Китайской равнины) и горный пояс (горы) Хуаншань³, изменяясь с высокогорного запада к восточному низменному морскому побережью (см. рис. 1).

В целом положение территории над уровнем моря колеблется от 5–50 до 1864 м (пик Лотоса, гора Хуаншань). Резкорасчлененный рельеф исследуемой территории контролирует области и интенсивность питания и разгрузки природных вод.

Следующий немаловажный фактор – это атмосферные осадки, определяющие объем, динамику питания и, в значительной степени, химический состав воды. Количество выпадающих атмосферных осадков на равнине и в горноскладчатой области различно. В ходе работы использовались результаты наблюдений на двух метеорологических станциях, одной из которых является Шанхайская, находящаяся на равнинной территории среднего и нижнего течения реки Янцзы (см. рис. 1), где осадки не превышают 1250 мм/год (рис. 4). При продвижении на запад под влиянием горных барьеров

происходит восходящее движение воздушных масс, усиливается конденсация влаги, поэтому количество осадков начинает возрастать, о чем свидетельствуют данные метеонаблюдений на второй метеорологической станции (Хуаншаньской), расположенной в горном поясе (см. рис. 1) и зафиксировавшей значения выпадающих осадков до 2400 мм/год (см. рис. 4). При оценке ресурсов природных вод не менее важны сезонные колебания осадков, максимальное количество которых выпадает в весенне-летний период (май, июнь и июль), минимальное – осенью и зимой (октябрь, ноябрь, декабрь) (см. рис. 2, 3).

Температурный режим также является одним из важнейших факторов, влияющих на формирование водных ресурсов. Для исследуемой территории характерен субтропический климат. Огромную роль здесь играют близость Тихого океана и муссоны [9]. Самые низкие температуры обычно наблюдаются в декабре, январе и в феврале, а самые высокие – в июле и августе.

Летом температура воздуха на территории равнины среднего и нижнего течения реки Янцзы достигает 28–35 °С. Теплые зимы обусловлены защитой горных хребтов от проникновения северных холодных воздушных масс,

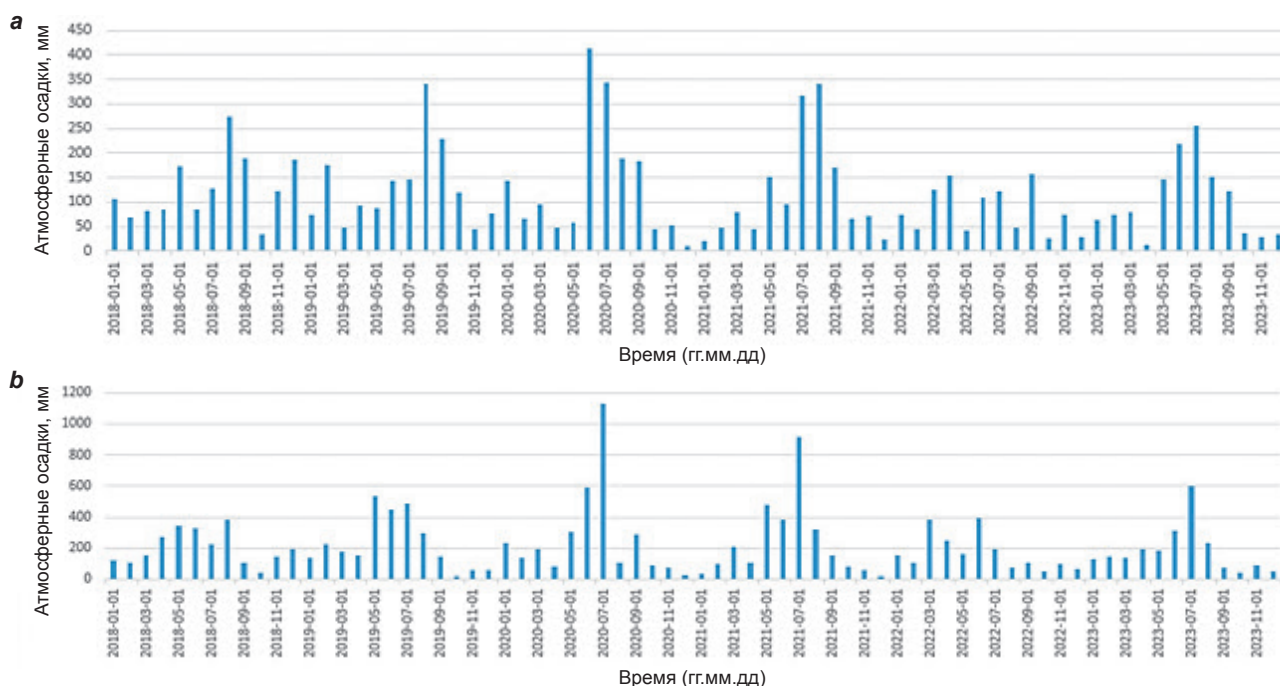


Рис. 4. Внутригодовое распределение количества атмосферных осадков (среднегодовое значения по данным станций за период 2018–2023 гг.):

a – Шанхайская станция; b – Хуаншаньская станция

Fig. 4. Annual distribution of precipitation amount (average long-term values according to station data for the period from 2018 to 2023):

a – Shanghai station; b – Huangshan station

³ Петухов В.Б. География Китая: учеб. пособие. Ульяновск: Изд-во УлГТУ, 2021. 236 с.



средняя температура составляет 3–6 °С. В горном районе Хуаншань температура в летний период равна 18,3–20,8 °С, зимой колеблется от -1,8 до 0,1 °С. Температурные колебания приводят к существенным изменениям в количестве и интенсивности атмосферных осадков и испарения, а также к повышенной температуре ПВ и поверхностных вод.

Речная сеть в основном принадлежит бассейну реки Янцзы. Наиболее крупными притоками являются реки Хуанпу и Циньхуай (рис. 5). В настоящее время поверхностные воды – это основной источник хозяйственно-питьевого водоснабжения населения исследуемого региона. Хуанпу – самая большая река в центральной части Шанхая длиной 113 км, шириной до 400 м и глубиной до 9 м [10]. Основным приток Хуанпу – река Сучжоу-Крик, опробованная в процессе экспедиционных работ. Река Циньхуай протекает по территории городских округов Чжэньцзян и Нанкин провинции Цзянсу, ее длина составляет 36,6 км, площадь водосборного бассейна – 2631 км² [11].

Дельта Янцзы представляет собой один из основных озерных регионов Китая и включает множество небольших озер, прудов, проток и искусственных каналов, в том числе крупнейший в

мире судоходный Великий канал (Grand Canal) длиной 1782 км, а с ответвлениями в Пекин, Ханчжоу и Наньтун – 2470 км. В целом на равнинной территории дельты Янцзы насчитывается более 200 озер общей площадью 3159 км².

Самым крупным озером, которое расположено в пределах исследуемой территории и используется для водоснабжения, является Тайху (см. рис. 5), его длина составляет 68 км, ширина – 35,7 км. Озеро находится на высоте около 3 м над уровнем моря, его средняя глубина – 3,33 м².

В результате анализа имеющегося материала [12–17] составлена краткая характеристика химического состава поверхностных вод, обусловленного преимущественно атмосферными осадками (табл. 1). Химический состав воды в озере Тайху гидрокарбонатно-сульфатный кальциево-магниевый, в озерах исследуемой территории преобладают ультрапресные воды [12]. В Янцзы и ее притоках состав вод аналогичный: гидрокарбонатно-сульфатный кальциевый. Поверхностные воды характеризуются преимущественно нейтральной средой. Химический состав вод меняется в направлении от морского побережья вглубь материка, возрастает минерализация, увеличивается количество иона хлора.

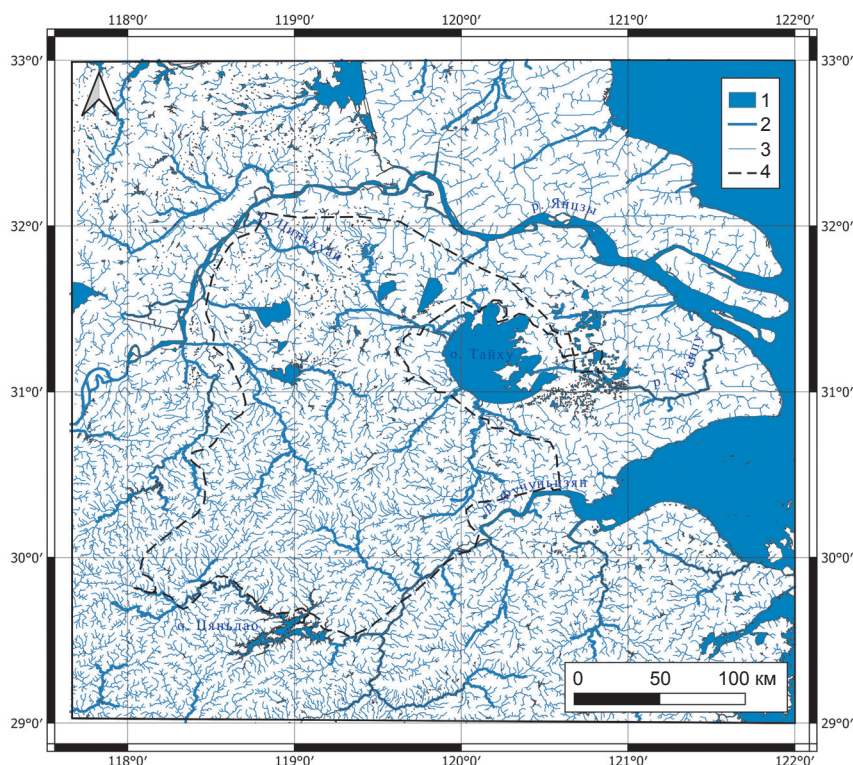


Рис. 5. Схема гидросети восточной территории Китая:

1 – озера; 2 – реки; 3 – водотоки; 4 – абрис движения экспедиции

Fig. 5. Diagram of the hydrographic network of the eastern territory of China:

1 – lakes; 2 – rivers; 3 – watercourses; 4 – expedition route outline



Таблица 1. Характеристика химических показателей поверхностных вод
Table 1. Characteristics of surface water chemical parameters

Показатель	Место отбора проб воды		
	Озеро*	Реки**	Река Фучуньцзян***
Абсолютная высота, м	8–109	3–127	5
Содержание катионов, мг/л:			
K ⁺	5	2,29–9,65	6,95/64,89
Na ⁺	8,7	5,45–23,1	52,43/779,9
Ca ²⁺	48,7	10,7–76,3	10,37/68,25
Mg ²⁺	42,3	3,81–12,4	4,07/67,14
Содержание анионов, мг/л:			
SO ₄ ²⁻	77,1	8,9–119	3,35/107,68
CL ⁻	53,2	6,76–20,3	42,26/1773,8
HCO ₃ ⁻	159,3	51,3–137	124,9/1026
Минерализация, г/дм ³	0,07–0,21	0,18–0,35	0,3/5,6
pH	6,48–7,48	6,15–7,31	7,22
Еh	100,7–288,1	250,8–484	206/3837

Примечание. * – содержание анионов и катионов приведено для озера Тайху; ** – содержание анионов и катионов приведено для реки Янцзы и ее притоков; *** – до прилива морской волны / после прилива морской волны.

Следует подчеркнуть, что поверхностные воды подвержены загрязнению различного характера и требуют усиленного контроля качества, что существенно осложняет их использование для водоснабжения.

Следующий значимый фактор – геологическое строение территории (рис. 6), влияющее как на состав природной воды, так и на ее количество в зависимости от пустотности вмещающих пород. Северная и восточная части представлены терригенными отложениями четвертичного возраста. С силурийского периода до среднего триаса в этом регионе преобладала морская среда осадконакопления, в связи с чем здесь широко развиты карбонатные породы: известняки и доломиты. С позднего триаса до четвертичного периода установилась континентальная обстановка и сформировались осадочные породы: песчаник, аргиллит и пр.

Горноскладчатая юго-западная часть района представлена образованиями палеозойского возраста, прорванными на ряде участков, в том числе на площади расположения гор Хуаншань, гранитными интрузиями, свидетельствующими о продолжающемся процессе формирования горной системы.

Перечисленные выше факторы предопределили формирование структурно-геологических условий территории исследований. Анализ исходного материала о климатических особенностях, структурно-тектонических и геоморфологических условиях позволил выде-

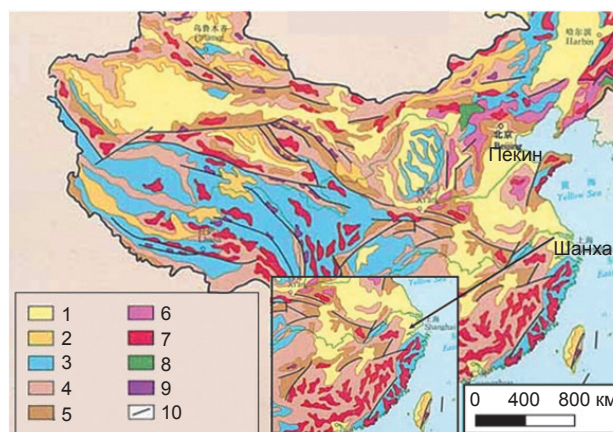


Рис. 6. Геологическая карта Китая
(масштаб 1:200000000)⁴:

1–6 – возраст горных пород: 1 – четвертичный, 2 – неоген – палеоген, 3 – мезозойский, 4 – палеозойский, 5 – протерозойский, 6 – архейский; 7–9 – состав горных пород: 7 – гранит, 8 – базальт, 9 – основные – ультраосновные породы; 10 – разломы

Fig. 6. Geological map of China
(scale 1:200000000)⁴:

1–6 – rock age: 1 – Quaternary, 2 – Neogene – Paleogene, 3 – Mesozoic, 4 – Paleozoic, 5 – Proterozoic, 6 – Archean; 7–9 – rock composition: 7 – granite, 8 – basalt, 9 – basic – ultramafic rocks; 10 – faults

лить основные гидрогеологические структуры: гидрогеологический бассейн, гидрогеологический массив, обводненные разломы (рис. 7).

Гидрогеологический бассейн приурочен к пониженным участкам рельефа, располагающимся преимущественно в долине реки Янцзы. Водовмещающими являются четвертичные отложения, мощность которых увели-

⁴ Ma L.F. Geological atlas of China. Beijing: Geological Publishing House, 2002. 356 p. (In Chinese).

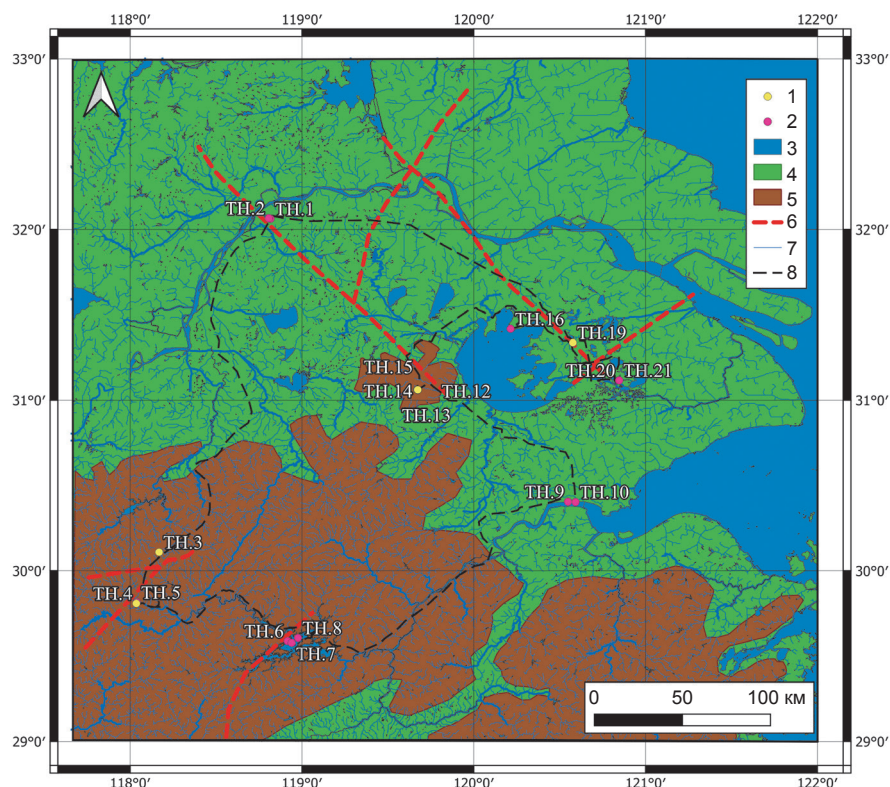


Рис. 7. Структурно-гидрогеологическая карта территории исследования:

- 1 – место отбора проб из подземных источников; 2 – место отбора проб из поверхностных источников;
3 – водные объекты; 4 – гидрогеологический бассейн; 5 – гидрогеологический массив;
6 – обводненные разломы; 7 – гидросеть; 8 – абрис движения экспедиции

Fig. 7. Structural-hydrogeological map of the area under investigation:

- 1 – sampling site from underground sources; 2 – sampling site from surface sources; 3 – water bodies;
4 – hydrogeological basin; 5 – hydrogeological massif; 6 – flooded faults; 7 – hydrographic network;
8 – expedition route outline

чивается с запада на восток и изменяется от 250 до 350 м. Порово-пластовые воды вскрываются на глубине 3,3–17 м, дебит одиночных скважин составляет 300–5000 м³/сут, минерализация равна 0,4–(1,36–9,69) дм³ (г. Шанхай), химический состав варьируется от гидрокарбонатного натриевого до хлоридно-сульфатного натриево-магниево-кальциевого, изменяясь в восточном направлении в сторону морского побережья, pH равен 6,99, температура ПВ составляет 18 °С (табл. 2) [13].

ПВ гидрогеологического бассейна могут использоваться для хозяйственно-питьевого водоснабжения. На предыдущих этапах эксплуатации в результате длительного и нерационального водоотбора в водоносный горизонт началось интенсивное поступление морских вод, в связи с чем резко ухудшилось качество ПВ.

Гидрогеологический массив приурочен к горноскладчатой области и представлен гранитами и карбонатными породами юрского возраста. Повсеместно обводнена мощная зона экзогенной трещиноватости. Водообильность

зоны невысока, трещинно-грунтовые воды вскрываются на глубине 2,3–9,42 м, минерализация составляет 0,17–0,21 г/дм³, pH 5,93–7,92, температура равна 20 °С (см. табл. 2). ПВ этого типа используются для наполнения емкостей для пожаротушения и мелкого хозяйственно-питьевого водоснабжения.

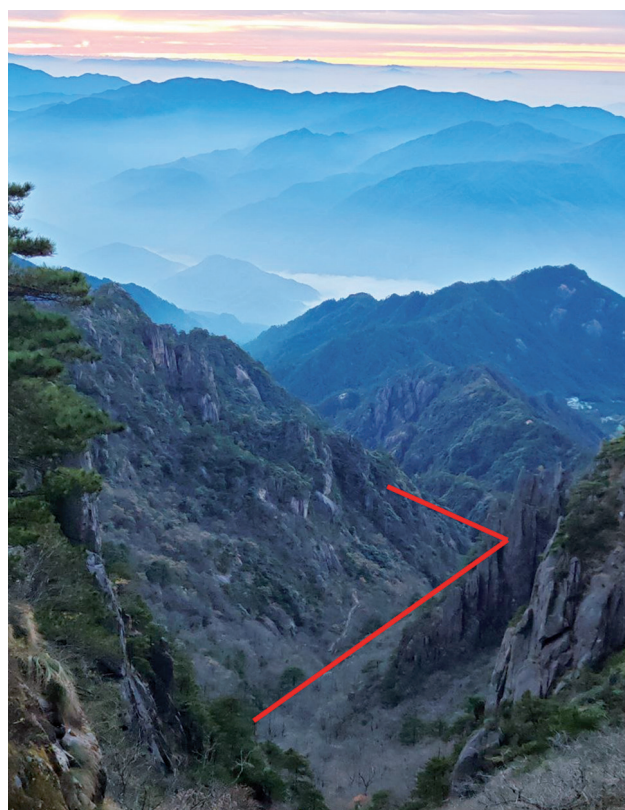
Третий тип гидрогеологических структур – обводненные разломы, широко распространенные в горноскладчатых областях (рис. 8). Часто они имеют характер сбросо-сдвигов [19], отражающихся в виде z-образных структур в рельефе (горы Хуаншань (см. рис. 8, а)), что нередко встречается в Приольхонье на западном берегу Байкала (Сарминское, Курминское ущелье (см. рис. 8, b, c)).

В зависимости от состава пород, нарушенных дизъюнктивными дислокациями, выделяются трещинно-жильные и трещинно-карстовые ПВ, характеристика которых приведена в табл. 2. В соответствии с глубиной проникновения в земную кору выделены приповерхностные и глубокие разломы.



Таблица 2. Краткая характеристика подземных вод территории исследования
Table 2. Brief characteristics of groundwater in the area under investigation

Показатель	Гидрогеологические структуры				
	Гидрогеологический бассейн	Гидрогеологический массив	Обводненные разломы		
Тип коллектора	Порово-пластовые	Трещинно-грунтовые	Трещинно-жильные		Трещинно-карстовые
			Приповерхностные	Глубокие	
Уровень подземных вод, м	3,3–17	2,3–9,42	2,1	71	12
Горные породы	Рыхлые песчано-глинистые отложения	Известняки, граниты	Туфы, брекчии	Карбонатные породы	Известняки, доломиты
Содержание катионов, мг/л:					
K ⁺	1,1–1,83	–	–	14,4	0,28–0,37
Na ⁺	32,1–154,64	–	–	25,6	2,79–5,88
Ca ²⁺	3,97–62,20	–	–	420	6–93
Mg ²⁺	8,37–69,19	–	–	52	6,48–41
Содержание анионов, мг/л:					
SO ₄ ²⁻	0,2–0,67	–	–	1171	25,5–53,2
Cl ⁻	3,83–550,24	–	–	15	7,48–15
HCO ₃ ⁻	15,74–78,72	–	–	16	237–367
Минерализация, г/дм ³	0,4–(1,36–9,69) (г. Шанхай)	0,21	0,305	1,75	0,411
pH	6,99–8,36	6,1–7,42	6,16	6,7–7,4	6,94
Температура, °C	18–19	20	21,3	32–60 и выше	20,8



а



b



с

Рис. 8. Сбросо-сдвиги, отражающиеся в виде z-образных структур в рельефе:

а – горы Хуаншань; б – Сарминское ущелье; с – Курминское ущелье

Fig. 8. Strike-slip faults reflected as z-shaped structures in the relief:

а – Huangshan Mountains; б – Sarminskoe Gorge; с – Kurminskoe Gorge



Наиболее изучены глубокие дизъюнктивные структуры, по которым разгружаются минеральные и термальные воды [19], формирующиеся в карбонатных породах и имеющие сульфатный кальциевый состав. По химическому составу ПВ, приуроченные к гранитам, характеризуются как гидрокарбонатные кальциевые. Достаточно высокая степень изученности ПВ глубоких разломов обусловлена широким развитием санаторно-курортной и туристической баз в стране [20].

Тем не менее наибольший интерес для поисково-оценочных работ с целью последующего хозяйственно-питьевого водоснабжения представляют наименее изученные ПВ приповерхностных обводненных разломов, которые вскрываются на глубине 2,1 м, имеют минерализацию 0,305 г/дм³, pH 6,16, температуру 21,3 °C (см. табл. 2).

Заключение

Проведенное исследование позволило сделать вывод о том, что, вероятнее всего,

ситуацию со снабжением водой хозяйственно-питьевого назначения может улучшить выбор оптимальной схемы водоснабжения в различных структурно-гидрогеологических условиях. В равнинных областях среднего и нижнего течений реки Янцзы наиболее рациональным является использование поверхностных вод и порово-пластовых ПВ гидрогеологического бассейна. В горно-складчатых областях перспективным источником водоснабжения представляются ПВ приповерхностных обводненных разломов, уточнение расположения которых возможно при проведении более детальных геолого-разведочных исследований.

Для выработки оптимальных решений, направленных на эффективное управление водными ресурсами, необходима координация работы департаментов, занимающихся различными аспектами этой проблемы. Такой подход позволит в дальнейшем совершенствовать структуру управления водными ресурсами восточных районов Китая.

Список источников

1. Zhu Z., Zhou H., Ouyang T., Deng Q., Kuang Y., Huang N. Water shortage: a serious problem in sustainable development of China // *International Journal of Sustainable Development & World Ecology*. 2001. Vol. 8. Iss. 3. P. 233–237. <https://doi.org/10.1080/13504500109470080>.
2. Meng C., Du X., Ren Y., Shen L., Cheng G., Wang J. Sustainable urban development: an examination of literature evolution on urban carrying capacity in the Chinese context // *Journal of Cleaner Production*. 2020. Vol. 277. P. 122802. <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2020.122802>.
3. Zhang Q., Hui Q., Xu P., Hou K., Yang F. Groundwater quality assessment using a new integrated-weight water quality index (IWQI) and driver analysis in the Jiaokou Irrigation District, China // *Ecotoxicology and Environmental Safety*. 2021. Vol. 212. P. 111992. <https://doi.org/10.1016/j.ecoenv.2021.111992>.
4. Zeng Y., Xu L., Su J., Ali A., Peng Z., Li X. Assembling fixed-biofilm reactor with modified basalt fiber and modified wild jujube seed biochar for concurrent removal of nitrate, tetracycline and cadmium: performance and microflora response // *Journal of Cleaner Production*. 2024. Vol. 434. P. 140190. <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2023.140190>.
5. Митина Н.Н., Чжоу Ч., Шумакова Е.М. Современное состояние водных ресурсов и водного хозяйства Китайской Народной Республики // *Инновации и инвестиции*. 2022. № 6. С. 46–51. EDN: CLHHTW.
6. Li M.-G., Chen J.-J., Xu Y.-S., Tong D.-G., Cao W.-W., Shi, Y.-J. Effects of groundwater exploitation and recharge on land subsidence and infrastructure settlement patterns in Shanghai // *Engineering Geology*. 2021. Vol. 282. P. 105995. <https://doi.org/10.1016/j.enggeo.2021.105995>.
7. Аузина Л.И., Чжан Ю., Устюжанин А.О., Ярошук И.А., Масликов О.С., Ковтун К.К. Условия формирования основных экзогенных процессов в юго-западной части Байкальской рифтовой системы (Россия) и восточной части Южно-Китайского блока (Китай) // *Науки о Земле и недропользование*. 2020. Т. 43. № 2. С. 256–270. <https://doi.org/10.21285/2686-9993-2020-43-2-256-270>. EDN: YXELGM.
8. Molnar P., Tapponnier P. Cenozoic tectonics of Asia: effects of a continental collision // *Science*. 1975. Vol. 189. Iss. 4201. P. 419–426. <https://doi.org/10.1126/science.189.4201.419>.
9. Gu C., Hu L., Zhang X., Wang X., Guo J. Climate change and urbanization in the Yangtze River Delta // *Habitat International*. 2011. Vol. 35. Iss. 4. P. 544–552. <https://doi.org/10.1016/j.habitatint.2011.03.002>.
10. Chang Y. Water quality assessment and source apportionment of Huangpu River water pollution in Shanghai City, eastern China using APCS-MLR // *Research Article*. 2023. <https://doi.org/10.21203/rs.3.rs-3188746/v1>.
11. Song M., Zhang J., Bian G., Jie W., Wang G. Quantifying effects of urban land-use patterns on flood regimes for a typical urbanized basin in eastern China // *Hydrology Research*. 2020. Vol. 51. Iss. 6. P. 1521–1536. <https://doi.org/10.2166/nh.2020.110>.
12. Yuan X., Li J., Mao C., Ji J., Yang Z. Geochemistry of water and suspended particulate in the lower Yangtze River: implications for geographic and anthropogenic effects // *International Journal of Geosciences*. 2012. Vol. 3. Iss. 1. P. 81–92. <https://doi.org/10.4236/ijg.2012.31010>.



13. Zhan G., Li J., Wang H., Wen X., Gu H. Origin and hydrochemical evolution of confined groundwater in Shanghai, China // *Frontiers in Earth Science*. 2023. Vol. 11. P. 1117132. <https://doi.org/10.3389/feart.2023.1117132>.
14. Li X., Tang C., Cao Y., Li D. A multiple isotope (H, O, N, C and S) approach to elucidate the hydrochemical evolution of shallow groundwater in a rapidly urbanized area of the Pearl River Delta, China // *Science of The Total Environment*. 2020. Vol. 724. P. 137930. <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2020.137930>.
15. Sheng D., Meng X., Wen X., Wu J., Yu H., Wu M., et al. Hydrochemical characteristics, quality and health risk assessment of nitrate enriched coastal ground-water in northern China // *Journal of Cleaner Production*. 2023. Vol. 403. P. 136872. <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2023.136872>.
16. Zeng Y., Xu L., Su J., Ali A., Peng Z., Li X. Assembling fixed-biofilm reactor with modified basalt fiber and modified wild jujube seed biochar for concurrent removal of nitrate, tetracycline and cadmium: performance and microflora response // *Journal of Cleaner Production*. 2024. Vol. 434. P. 140190. <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2023.140190>.
17. Wen Y., Qiu J., Si C., Xu C., Gao X. Hydrochemical evolution mechanisms of shallow groundwater and its quality assessment in the estuarine coastal zone: a case study of Qidong, China // *International Journal of Environmental Research and Public Health*. 2020. Vol. 17. Iss. 10. P. 3382. <https://doi.org/10.3390/ijerph17103382>.
18. Денисенко И.А., Лунина О.В. Позднечетвертичные смещения вдоль Сарминского участка Приморско-го разлома по данным георадиолокации (Байкальский рифт) // *Геодинамика и тектонофизика*. 2020. Т. 11. № 3. С. 548–565. <https://doi.org/10.5800/GT-2020-11-3-0490>. EDN: KEZTKM.
19. Ma J., Zhou Z. Origin of the low-medium temperature hot springs around Nanjing, China // *Open Geosciences*. 2021. Vol. 13. Iss. 1. P. 820–834. <https://doi.org/10.1515/geo-2020-0269>.
20. Валькова Т.М., Красавцев И.В., Тан Ц. Туризм в Китае: современное состояние, основные факторы, влияющие на его развитие // *Географическая среда и живые системы*. 2023. № 4. С. 53–72. <https://doi.org/10.18384/2712-7621-2023-4-53-72>. EDN: KOTFZU.

References

1. Zhu Z., Zhou H., Ouyang T., Deng Q., Kuang Y., Huang N. Water shortage: a serious problem in sustainable development of China. *International Journal of Sustainable Development & World Ecology*. 2001;8(3):233-237. <https://doi.org/10.1080/13504500109470080>.
2. Meng C., Du X., Ren Y., Shen L., Cheng G., Wang J. Sustainable urban development: an examination of literature evolution on urban carrying capacity in the Chinese context. *Journal of Cleaner Production*. 2020;277:122802. <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2020.122802>.
3. Zhang Q., Hui Q., Xu P., Hou K., Yang F. Groundwater quality assessment using a new integrated-weight water quality index (IWQI) and driver analysis in the Jiaokou Irrigation District, China. *Ecotoxicology and Environmental Safety*. 2021;212:111992. <https://doi.org/10.1016/j.ecoenv.2021.111992>.
4. Zeng Y., Xu L., Su J., Ali A., Peng Z., Li X. Assembling fixed-biofilm reactor with modified basalt fiber and modified wild jujube seed biochar for concurrent removal of nitrate, tetracycline and cadmium: performance and microflora response. *Journal of Cleaner Production*. 2024;434:140190. <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2023.140190>.
5. Mitina N.N., Zhou Ch., Shumakova E.M. The current state of water resources and water management in the People's Republic of China. *Innovation & Investment*. 2022;6:46-51. (In Russ.). EDN: CLHHTW.
6. Li M.-G., Chen J.-J., Xu Y.-S., Tong D.-G., Cao W.-W., Shi, Y.-J. Effects of groundwater exploitation and recharge on land subsidence and infrastructure settlement patterns in Shanghai. *Engineering Geology*. 2021;282:105995. <https://doi.org/10.1016/j.enggeo.2021.105995>.
7. Auzina L.I., Zhang Y., Ustyuzhanin A.O., Yaroshchuk I.A., Maslikov O.S., Kovtun K.K. Conditions of the formation of the main exogenous processes in the southwest part of the Baikal rift system (Russia) and in the eastern part of the south China block (China). *Earth sciences and subsoil use*. 2020;43(2):256-270. (In Russ.). <https://doi.org/10.21285/2686-9993-2020-43-2-256-270>. EDN: YXELGM.
8. Molnar P., Tapponnier P. Cenozoic tectonics of Asia: effects of a continental collision. *Science*. 1975;189(4201):419-426. <https://doi.org/10.1126/science.189.4201.419>.
9. Gu C., Hu L., Zhang X., Wang X., Guo J. Climate change and urbanization in the Yangtze River Delta. *Habitat International*. 2011;35(4):544-552. <https://doi.org/10.1016/j.habitatint.2011.03.002>.
10. Chang Y. Water quality assessment and source apportionment of Huangpu River water pollution in Shanghai City, eastern China using APCS-MLR. *Research Article*. 2023. <https://doi.org/10.21203/rs.3.rs-3188746/v1>.
11. Song M., Zhang J., Bian G., Jie W., Wang G. Quantifying effects of urban land-use patterns on flood regimes for a typical urbanized basin in eastern China. *Hydrology Research*. 2020;51(6):1521-1536. <https://doi.org/10.2166/nh.2020.110>.
12. Yuan X., Li J., Mao C., Ji J., Yang Z. Geochemistry of water and suspended particulate in the lower Yangtze River: implications for geographic and anthropogenic effects. *International Journal of Geosciences*. 2012;3(1):81-92. <https://doi.org/10.4236/ijg.2012.31010>.
13. Zhan G., Li J., Wang H., Wen X., Gu H. Origin and hydrochemical evolution of confined groundwater in Shanghai, China. *Frontiers in Earth Science*. 2023;11:1117132. <https://doi.org/10.3389/feart.2023.1117132>.
14. Li X., Tang C., Cao Y., Li D. A multiple isotope (H, O, N, C and S) approach to elucidate the hydrochemical evolution of shallow groundwater in a rapidly urbanized area of the Pearl River Delta, China. *Science of The Total Environment*. 2020;724:137930. <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2020.137930>.



15. Sheng D., Meng X., Wen X., Wu J., Yu H., Wu M., et al. Hydrochemical characteristics, quality and health risk assessment of nitrate enriched coastal ground-water in northern China. *Journal of Cleaner Production*. 2023;403:136872. <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2023.136872>.
16. Zeng Y., Xu L., Su J., Ali A., Peng Z., Li X. Assembling fixed-biofilm reactor with modified basalt fiber and modified wild jujube seed biochar for concurrent removal of nitrate, tetracycline and cadmium: performance and microflora response. *Journal of Cleaner Production*. 2024;434:140190. <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2023.140190>.
17. Wen Y., Qiu J., Si C., Xu C., Gao X. Hydrochemical evolution mechanisms of shallow groundwater and its quality assessment in the estuarine coastal zone: a case study of Qidong, China. *International Journal of Environmental Research and Public Health*. 2020;17(10):3382. <https://doi.org/10.3390/ijerph17103382>.
18. Denisenko I.A., Lunina O.V. Late Quarternary displacements along the Sarma segment of the Primorsky fault based on gpr survey data (Baikal rift). *Geodynamics & Tectonophysics*. 2020;11(3):548-565. (In Russ.). <https://doi.org/10.5800/GT-2020-11-3-0490>. EDN: KEZTKM.
19. Ma J., Zhou Z. Origin of the low-medium temperature hot springs around Nanjing, China. *Open Geosciences*. 2021;13(1):820-834. <https://doi.org/10.1515/geo-2020-0269>.
20. Valkova T.M., Krasavtsev I.V., Tang Quan. Tourism in China: current status, the main factors influencing its development. *Geographical Environment and Living Systems*. 2023;4:53-72. (In Russ.). <https://doi.org/10.18384/2712-7621-2023-4-53-72>. EDN: KOTFZU.

Информация об авторах / Information about the authors



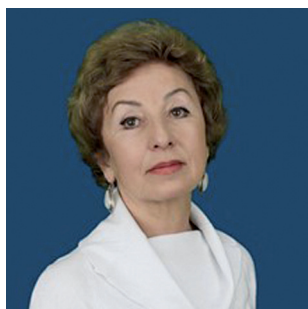
Сумкин Андрей Александрович,
студент,
институт «Сибирская школа геонаук»,
Иркутский национальный исследовательский технический университет,
г. Иркутск, Россия,
✉ andrey.sumkin.00@mail.ru
<https://orcid.org/0009-0004-7581-5180>
Andrei A. Sumkin,
Student,
Siberian School of Geosciences,
Irkutsk National Research Technical University,
Irkutsk, Russia,
✉ andrey.sumkin.00@mail.ru
<https://orcid.org/0009-0004-7581-5180>



Чэнь Чжанчи,
студент,
Школа географии,
Нанкинский педагогический университет,
г. Нанкин, Китай,
1679501856@qq.com
<https://orcid.org/0009-0008-1321-4231>
Zhangchi Chen,
Student,
School of Geography,
Nanjing Normal University,
Nanjing, China,
1679501856@qq.com
<https://orcid.org/0009-0008-1321-4231>



Гнатюк Яна Сергеевна,
студент,
институт «Сибирская школа геонаук»,
Иркутский национальный исследовательский технический университет,
г. Иркутск, Россия,
gnatyk.yany@gmail.com
<https://orcid.org/0009-0006-4555-1895>
Iana S. Gnatyuk,
Student,
Siberian School of Geosciences,
Irkutsk National Research Technical University,
Irkutsk, Russia,
gnatyk.yany@gmail.com
<https://orcid.org/0009-0006-4555-1895>

**Аузина Лариса Ивановна,**

кандидат геолого-минералогических наук, доцент,
руководитель лаборатории гидрогеологии,
институт «Сибирская школа геонаук»,
Иркутский национальный исследовательский технический университет,
г. Иркутск, Россия,
lauzina@mail.ru
<https://orcid.org/0000-0002-4702-7863>

Larisa I. Auzina,

Cand. Sci. (Geol. & Mineral.), Associate Professor,
Head of the Hydrogeology Laboratory,
Siberian School of Geosciences,
Irkutsk National Research Technical University,
Irkutsk, Russia,
lauzina@mail.ru
<https://orcid.org/0000-0002-4702-7863>

**Чжан Юнчжань,**

доктор наук, профессор,
Школа географии и океанологии,
Нанкинский университет,
г. Нанкин, Китай,
zhangyzh@nju.edu.cn
<https://orcid.org/0000-0003-1118-8697>

Yongzhan Zhang,

Ph.D., Professor,
School of Geography & Ocean Science,
Nanjing University,
Nanjing, China,
zhangyzh@nju.edu.cn
<https://orcid.org/0000-0003-1118-8697>

Вклад авторов / Contribution of the authors

А.А. Сумкин – проведение исследования, визуализация, написание черновика рукописи, редактирование рукописи.

Ч. Чэнь – проведение исследования, курирование данных.

Я.С. Гнатюк – проведение исследования, визуализация, редактирование рукописи.

Л.И. Аузина – проведение исследования, административное руководство исследовательским проектом, разработка концепции, курирование данных, написание черновика рукописи, редактирование рукописи.

Ю. Чжан – проведение исследования, научное руководство, разработка концепции, курирование данных.

Andrei A. Sumkin – investigation, visualization, writing – original draft, writing – editing.

Zhangchi Chen – investigation, data curation.

Iana S. Gnatyuk – investigation, visualization, writing – editing.

Larisa I. Auzina – investigation, project administration, conceptualization, data curation, writing – original draft, writing – editing.

Yongzhan Zhang – investigation, supervision, conceptualization, data curation.

Конфликт интересов / Conflict of interests

Аузина Л.И. является членом редакционной коллегии журнала «Науки о Земле и недропользование» с 2018 года, но не имеет отношения к решению опубликовать эту статью. Статья прошла принятую в журнале процедуру рецензирования. Об иных конфликтах авторы не заявляли.

Larisa I. Auzina has been a member of the editorial board of the Earth Sciences and Subsoil Use journal since 2018, but she did not take part in making a decision about publishing the article under consideration. The article was peer reviewed following the journal's review procedure. The authors do not report any other conflicts of interests.

Все авторы прочитали и одобрили окончательный вариант рукописи.

The final manuscript has been read and approved by all the co-authors.

Информация о статье / Information about the article

Статья поступила в редакцию 23.04.2025; одобрена после рецензирования 02.05.2025; принята к публикации 20.05.2025.

The article was submitted 23.04.2025; approved after reviewing 02.05.2025; accepted for publication 20.05.2025.



ГОРНОПРОМЫШЛЕННАЯ И НЕФТЕГАЗОПРОМЫСЛОВАЯ ГЕОЛОГИЯ, ГЕОФИЗИКА, МАРКШЕЙДЕРСКОЕ ДЕЛО И ГЕОМЕТРИЯ НЕДР

Научная статья

УДК 550.8.023

EDN: DVYQZP

DOI: 10.21285/2686-9993-2025-48-2-237-248



Расчет компонентно-фракционного состава добываемого пластового флюида Ковыктинского месторождения

М.Л. Белькович^а

^а*Иркутский национальный исследовательский технический университет, Иркутск, Россия*

Резюме. Целью работы являлся расчет компонентно-фракционного состава добываемого пластового флюида при помощи комплексных лабораторных исследований. Актуальность состояла в получении достоверных данных о характеристиках пластового флюида для обеспечения эффективного управления процессами добычи и обработки углеводородов. В результате лабораторных исследований был определен фазовый состав глубинных проб, которые являются пластовым газом. Для каждой из проб были установлены зависимости плотности и вязкости от давления, что помогает лучше оценивать поведение флюида при различных условиях добычи. Кроме того, проведенные исследования позволили выявить влияние геологических факторов на состав и свойства флюидов, что является важным для оптимизации процессов добычи. Для пластового газа была проведена дегазация, определен подробный компонентно-фракционный состав газа дегазации и дегазированного конденсата. Составы всех исследованных газов представлены в двух видах: в развернутой компонентно-фракционной форме (когда неуглеводородные компоненты и углеводороды от метана до пентанов представлены индивидуально, а углеводороды тяжелее пентанов сгруппированы в узкие десятиградусные фракции, ранжированные по температурам кипения углеводородов) и в стандартной форме (когда компоненты тяжелее пентана приведены в виде фракций по числу атомов углерода с более или менее тяжелым остатком). Состав пластового газа рассчитан на основе составов газа дегазации и дегазированного конденсата по принципу материального баланса. Полученные данные могут быть использованы для анализа процесса добычи углеводородов и дальнейшего повышения эффективности разработки Ковыктинского месторождения. Результаты работы способствуют более глубокому пониманию характеристик пластового флюида и открывают новые перспективы для улучшения технологий добычи и переработки углеводородов.

Ключевые слова: скважина, глубинная проба, пластовый газ, компонентно-фракционный состав, физико-химические свойства

Для цитирования: Белькович М.Л. Расчет компонентно-фракционного состава добываемого пластового флюида Ковыктинского месторождения // Науки о Земле и недропользование. 2025. Т. 48. № 2. С. 237–248. <https://doi.org/10.21285/2686-9993-2025-48-2-237-248>. EDN: DVYQZP.

APPLIED MINING AND PETROLEUM FIELD GEOLOGY, GEOPHYSICS, MINE SURVEYING AND SUBSOIL GEOMETRY

Original article

Calculation of component-fractional composition of extracted Kovykta field formation fluid

Mikhail L. Belkovich^а

^а*Irkutsk National Research Technical University, Irkutsk, Russia*

Abstract. The purpose of the work is to calculate the component-fractional composition of the produced formation fluid using complex laboratory studies. The relevance of the study is determined by the obtaining of reliable data on formation fluid characteristics in order to ensure effective management of hydrocarbon production and processing. The laboratory studies resulted in the determination of the phase composition of downhole samples, which were presented by formation gas. Dependences of density and viscosity on pressure were determined for each sample, which enabled better assessment of fluid behavior under various production conditions. In addition, the conducted studies allowed us to identify the influence of geological factors on fluid composition and properties, which is important for optimizing production processes. Formation gas was subjected to degassing and a detailed component-fractional composition of degassing gas and degassed condensate was determined. The compositions of all the gases studied have been presented in two forms: an expanded component-fractional form (non-hydrocarbon components and hydrocarbons from methane to pentanes are presented individually, and hydrocarbons heavier than pentanes



are grouped into narrow ten-degree fractions ranked by hydrocarbon boiling points) and a standard form (components heavier than pentane are presented as fractions by the number of carbon atoms with a more or less heavy residue). The composition of formation gas was calculated based on degassing gas and degassed condensate composition using the material balance principle. The data obtained can be used to analyze the hydrocarbon production process and further enhancement of the efficiency of the Kovykta field development. The research results contribute to deeper understanding of formation fluid characteristics and open new prospects for improving hydrocarbon production and processing technologies.

Keywords: well, downhole sample, formation gas, component-fractional composition, physical-chemical properties

For citation: Belkovich M.L. Calculation of component-fractional composition of extracted Kovykta field formation fluid. *Earth sciences and subsoil use*. 2025;48(2):237-248. (In Russ.). <https://doi.org/10.21285/2686-9993-2025-48-2-237-248>. EDN: DVMQZP.

Введение

На Ковыктинском газоконденсатном месторождении продуктивные отложения относятся к парфеновскому горизонту чорской свиты венда (его площадь составляет порядка 7 тыс. км²), который представляет собой переслаивание песчаников и аргиллитов с прослоями аргиллитов. В юго-восточном и северо-западном направлениях горизонт фациально переходит в более глинистые разности. В нем выделяют два продуктивных пласта – П1 и П2, между которыми залегает пачка аргиллитов, толщина которой варьируется, достигая 15 м [1]. Данные о компонентно-фракционном составе пластового флюида являются основой для расчетов в системах гидродинамического и технологического моделирования [2].

Расчет компонентно-фракционного состава добываемого пластового флюида представляет собой ключевой этап в нефтегазовой промышленности, определяющий состав и свойства добываемых нефти и газа. Достоверность прогнозных расчетов величины углеводородоотдачи в большой степени предопределяется знанием состояния и фазового поведения пластовых флюидов, насыщающих продуктивный коллектор [3].

В данной статье рассмотрена методика расчета компонентно-фракционного состава добываемого пластового флюида на основе результатов комплексных лабораторных анализов проб. Основные этапы исследований включают в себя физико-химические и газовые анализы, по результатам которых определяются содержание и пропорции таких компонентов, как углеводороды, сероводород, углекислый газ и пр.

Ключевым этапом рассматриваемого процесса являлось определение методик обра-

ботки (вычисления объемного состава, газового фактора и степени дополнительной конденсации наряду с другими показателями) и анализа данных. Достоверность полученных результатов имеет решающее значение для эффективности эксплуатации месторождения, определения объемов запасов углеводородного сырья и планирования будущих добычных операций¹.

Определение компонентно-фракционного состава добываемого флюида является ключевым этапом в работе инженеров и геологов. Полученные данные о его составе оказывают существенное влияние на эффективность процессов добычи и переработки углеводородов. Точность информации способствует оптимизации использования ресурсов и, следовательно, содействует устойчивому развитию нефтегазовой отрасли.

Материалы и методы исследования

Компонентно-фракционным составом газоконденсатной смеси (добываемого пластового газа) является состав, в котором газобразная часть представлена в виде индивидуальных углеводородных и неуглеводородных компонентов, а конденсатная часть – в виде фракций выкипания конденсатообразующих компонентов в определенных температурных границах, в мольных (объемных) и массовых долях или процентах². Основной объем природного газа, добываемого на газовых и газоконденсатных месторождениях, составляет метан, доля которого может достигать 90 процентов. Прочие углеводороды и неуглеводородные компоненты встречаются в значительно меньшей степени [4, 5].

¹ СТО Газпром 5.5-2007. Обеспечение единства измерений. Конденсат газовый нестабильный. Методика определения компонентно-фракционного и группового углеводородного состава. М.: Газпром, 2007. 86 с.

² СТО Газпром 2-3.3-1258-2021. Документы нормативные для проектирования, строительства и эксплуатации объектов ОАО «Газпром». Поиск, разведка и разработка месторождений углеводородов. Экспериментальные исследования на установках фазового равновесия. Газоконденсатные системы. СПб.: Газпром Экспо, 2021. 24 с.



Нестабильный газовый конденсат, ежегодная добыча которого в России в последние годы превышает 25 млн т, выделяют из пластового газа (сырья газоконденсатных месторождений)¹. Данные по химическому составу нестабильного газового конденсата необходимы для решения таких основных задач, как подсчет и учет изменений запасов газа и конденсата, а также – транспортировка и его переработка [6, 7].

Как правило, среди углеводородных компонентов выделяются две группы. В первую входят индивидуальные компоненты (метан, этан, пропан и пр.), во вторую – группы компонентов, представленные пентанами и более тяжелыми соединениями. Выделение последних в отдельную категорию обусловлено тем, что из всех компонентов добываемого пластового газа в процессе разработки месторождения наиболее существенно меняется содержание конденсата, представляющего собой углеводороды группы C₅₊, и неуглеводородных компонентов (смола, асфальтены, серо-содержащих соединений и т. д.) [8–10].

Дегазацией нестабильных жидких углеводородов является процесс их приведения из термобарических условий отбора пробы, при которых она является однофазной жидкой к стандартным условиям с разделением на газовую и жидкую фазы с целью определения компонентно-фракционного состава пробы³ [11–13]. Газовая хроматография находит широкое применение в изучении как жидких, так и газообразных углеводородов. Эта методика стала предметом множества исследований, которые значительно расширили область ее применения [14–18].

Анализ фазы пластового газа глубинных проб с целью определения компонентно-фракционного состава был проведен мето-

дом, отраженным в СТО Газпром 5.5-2007¹, и включал в себя следующие этапы:

1. Проведение дегазации фазы пластового газа при постоянных термобарических условиях (температуре и давлении), в процессе которой исходный пластовый газ разделялся на газ дегазации (замерен счетчиком) и дегазированный конденсат (взвешен). Было определено объемно-массовое соотношение процесса дегазации (газовый фактор). Значения газового фактора дегазации фазы пластового газа глубинных проб представлены в табл. 1. Полученные пробы газа дегазации и дегазированного конденсата были отобраны для проведения дальнейших хроматографических исследований.

2. Определение компонентно-фракционных составов проб газа дегазации методом газовой хроматографии. Анализ углеводородных компонентов проводится на капиллярной колонке с использованием пламенно-ионизационного детектора, анализ неуглеводородных компонентов – на насадочных колонках с регистрацией на детекторе по теплопроводности. Итоговый состав проб газа дегазации получают путем объединения углеводородного и неуглеводородного составов.

3. Определение компонентно-фракционного состава проб дегазированного конденсата, которое было проведено методом газовой хроматографии (имитированная дистилляция) с применением капиллярной колонки длиной 30 м.

4. Расчет состава фазы пластового газа был проведен по принципу материального баланса, рассчитанного с использованием газового фактора дегазации фазы пластового газа.

Оценка запасов углеводородов проводится отдельно для легких (CH₄, C₂H₆, C₃H₈ и т. д.) и тяжелых углеводородов. На основании по-

Таблица 1. Результаты проверки качества глубинных проб Ковыктинского месторождения
Table 1. Results of quality control of Kovykta deposit downhole samples

Контейнер, объем, см ³	Параметр отбора пробы		Параметр открытия баллона		Объем фаз при условиях перепуска в лабораторные контейнеры, см ³	Газовый фактор дегазации, м ³ /т	Заключение
	Температура, °С	Давление, МПа	Температура, °С	Давление, МПа			
№ 3365, 420	58	66,77	58	65,88	Пластовый газ – 100 %	18726,2	Проба качественна
№ 3542, 420	58	66,47	58	65,22	Пластовый газ – 100 %	18136,9	Проба качественна
№ 5092, 420	58	66,47	58	61	Пластовый газ – 100 %	15124,3	Проба качественна

³ СТО Газпром 5.40-2011. Пластовый газ. Определение компонентно-фракционного состава. М.: Газпром, 2011. 193 с.



следних, в частности по данным содержания пентанов, рассчитываются запасы газового конденсата^{4,5}.

В результате был определен компонентно-фракционный состав глубинных проб пластового газа от легких углеводородов (метан, этан, пропан) до конца кипения, включая неуглеводородные компоненты, такие как N_2 и CO_2 . Отобранные пробы в лаборатории были проверены на качество по методу, описанному в СТО Газпром 2-3.3-1258-2021².

У контейнеров с глубинными пробами пластового флюида замерено давление открытия при температуре отбора и проверено наличие или отсутствие газовой фазы. Если давление в контейнере достаточно высокое и газовая фаза отсутствует, то отобранные пробы являются качественными, то есть их компонентно-фракционный состав соответствует составу исследуемого продукта [10].

Результаты проверки качества глубинных проб пластового флюида представлены в табл. 1. Проверка показала, что все отобранные глубинные пробы качественны. В контейнерах содержится фаза пластового газа. Все пробы были переданы для дальнейших исследований.

Определение плотности фазы пластового газа глубинных проб было проведено с помощью плотномера высокого давления Anton Paar DMA 512 P вибрационного типа методом, отраженным в стандарте ASTM D 5002-19⁶, который описывает методику расчета компонентно-фракционного состава тяжелых и остаточных нефтепродуктов при пониженном давлении, а также метод, используемый для определения диапазона температур кипения нефтепродуктов, которые могут частично или полностью испаряться при максимальной температуре жидкости в 400 °C.

Указанный метод применяется для оценки дистилляционных характеристик нефтепродуктов и фракций, которые могут разлагаться во время перегонки при атмосферном давлении. Полученный диапазон кипения, рассчитанный

в условиях, обеспечивающих разделение на одной теоретической тарелке, может использоваться в технических расчетах для проектирования перегонного оборудования, разработки соответствующих смесей для промышленных нужд и проверки соответствия нормативным требованиям, а также для оценки возможности использования конкретного продукта в переработке или других целях. Интервал кипения тесно связан с такими характеристиками, как вязкость, упругость паров, теплотворная способность, средний молекулярный вес. Каждое из этих свойств может стать ключевым фактором в определении пригодности продукта для его предполагаемого использования [19].

Определение вязкости фазы пластового газа глубинных проб проведено с помощью вискозиметра EV 1000 согласно руководству по эксплуатации⁷. В основе работы данного прибора лежит явление электромагнетизма. Два соленоиды управляют движением поршня вверх и вниз под воздействием постоянного магнитного поля. Специальная электрическая схема анализирует время движения поршня для определения вязкости жидкости. Измерение показаний температуры производится при помощи встроенного датчика RTD.

Вискозиметрическая система включает электромагнитный вискозиметр SPSL 440 и набор из шести калиброванных поршней для измерения вязкости в диапазоне от 0,02 до 10000 сПз, датчик давления с цифровым дисплеем, датчик температуры и нагревательную рубашку. Нагрев осуществляется посредством внешнего нагревательного термостата с системой рециркуляции.

Результаты исследования и их обсуждение

Определение плотности и вязкости фазы пластового газа глубинных проб было проведено в диапазоне давлений при пластовой и стандартной температурах (20 °C). Результаты показаны на рис. 1–3.

⁴ ГОСТ Р 56539-2015. Проектирование разработки и освоение газовых и газоконденсатных месторождений. Подсчет запасов газа и газового конденсата на основе уравнения материального баланса. Основные технические требования. М.: Стандартинформ, 2016. 28 с.

⁵ Зотова Г.А., Алиева З.С. Инструкция по комплексному исследованию газовых и газоконденсатных скважин. М.: Недра, 1980. 301 с.

⁶ ASTM D 5002-2019. Стандартный метод определения плотности, относительной плотности и плотности в градусах API сырой нефти с помощью цифрового плотномера. М.: Интерстандарт, 2019.

⁷ EV 1000. Электромагнитный вискозиметр высокого давления и температуры // Представитель линии приборов VINCI Technologies в странах СНГ. Режим доступа: <http://www.vinci-technologies.ru/node/491> (дата обращения: 03.03.2025).

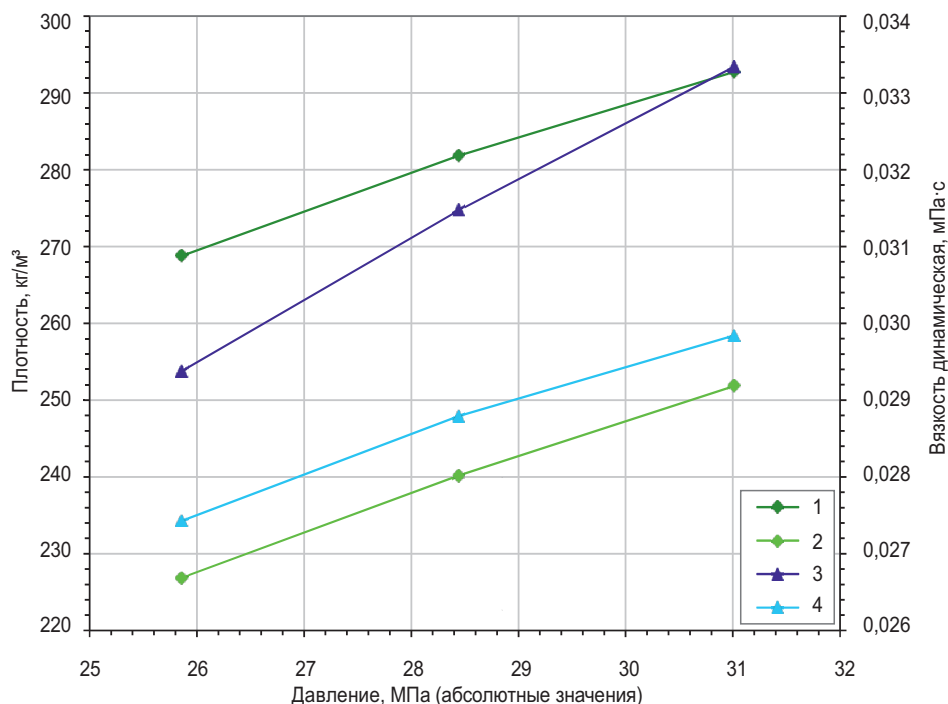


Рис. 1. Зависимость плотности и вязкости от давления для глубинной пробы пластового газа (контейнер № 5092):

1 – плотность при температуре 20 °C; 2 – плотность при температуре 58 °C;
3 – вязкость при температуре 20 °C; 4 – вязкость при температуре 58 °C

Fig. 1. Density and viscosity vs pressure for a formation gas downhole sample (container no. 5092):

1 – density at 20 °C; 2 – density at 58 °C; 3 – viscosity at 20 °C; 4 – viscosity at 58 °C

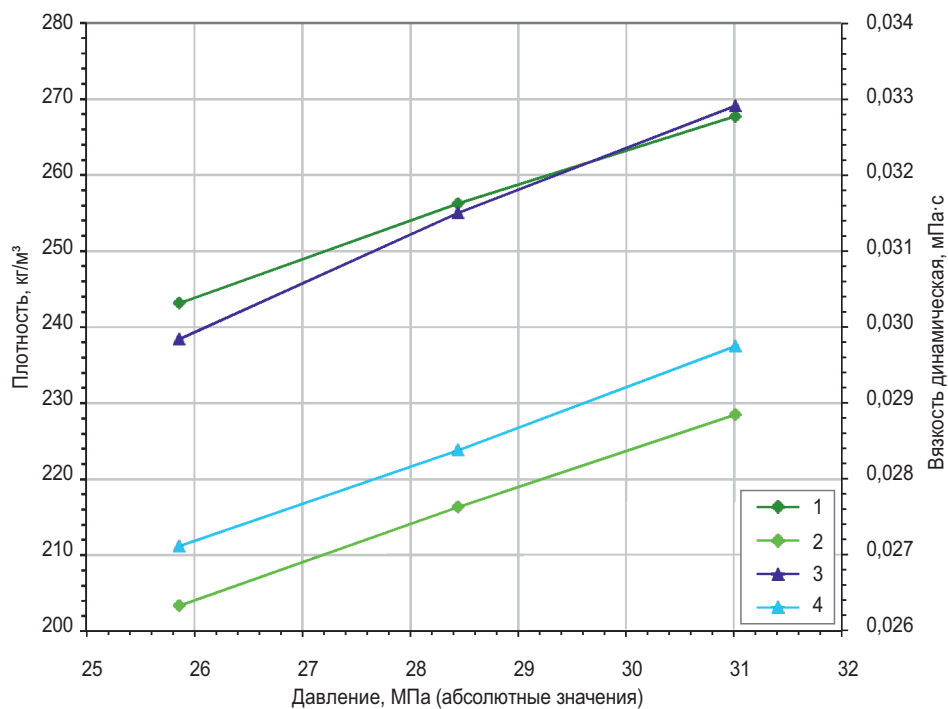


Рис. 2. Зависимость плотности и вязкости от давления для глубинной пробы пластового газа (контейнер № 3542)

Условные обозначения см. на рис. 1

Fig. 2. Density and viscosity vs pressure for a formation gas downhole sample (container no. 3542)

See Fig. 1 for legend

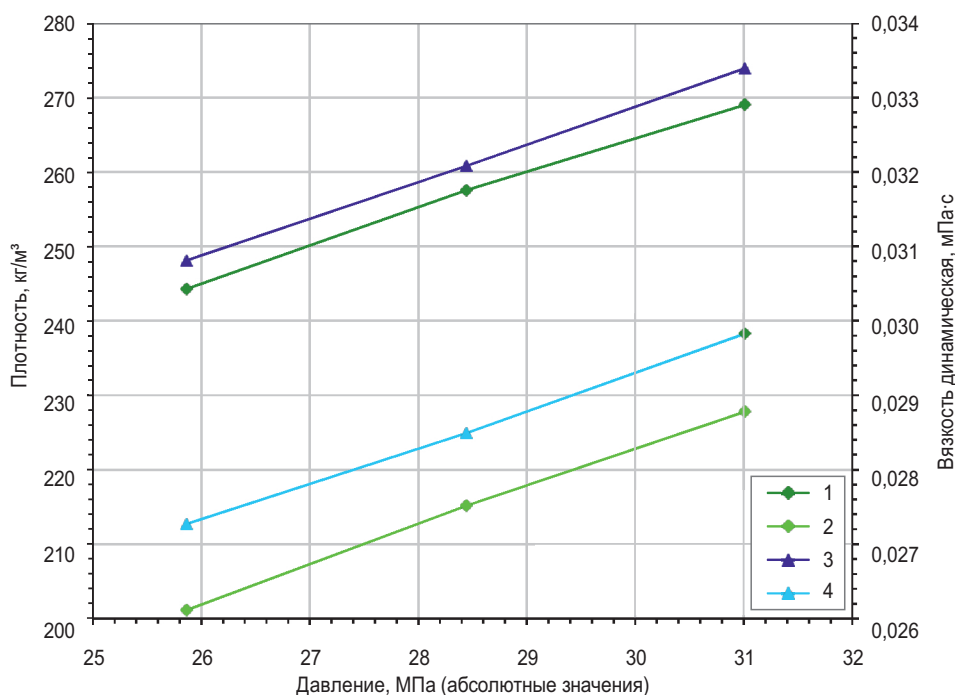


Рис. 3. Зависимость плотности и вязкости от давления для глубинной пробы пластового газа (контейнер № 3365)

Условные обозначения см. на рис. 1

Fig. 3. Density and viscosity vs pressure for a formation gas downhole sample (container no. 3365)

See Fig. 1 for legend

Компонентно-фракционные составы глубинных проб пластового газа приведены в табл. 2, 3 и на рис. 4.

Расчет молярной массы каждой пробы $M_{\text{НГК}}$ проводится по формуле

$$M_{\text{НГК}} = \sum \frac{x_i^{\text{НГК}}}{100} \times M_i,$$

где $x_i^{\text{НГК}}$ – молярная доля i -го компонента или фракции нестабильного газового конденсата, %; M_i – молярная масса i -го компонента или фракции нестабильного газового конденсата, г/моль (кг/кмоль); 100 – коэффициент для перевода долей в проценты.

Массовую долю i -го компонента и фракции в газоконденсатной смеси $w_i^{\text{ГКС}}$, %, вычисляют по формуле

$$w_i^{\text{ГКС}} = \frac{m_i^{\text{ГКС}}}{m_{\text{ГКС}}} \times 100,$$

где $m_i^{\text{ГКС}}$ – масса каждого i -го компонента, фракции в газоконденсатной смеси, кг; $m_{\text{ГКС}}$ – масса газоконденсатной смеси, кг; 100 – коэффициент для перевода долей в проценты.

Молярную долю i -го компонента, фракции в газоконденсатной смеси $x_i^{\text{ГКС}}$, %, вычисляют по формуле

$$x_i^{\text{ГКС}} = \sum \frac{n_i^{\text{ГКС}}}{n_{\text{ГКС}}} \times 100,$$

где $n_i^{\text{ГКС}}$ – количество каждого i -го компонента, фракции в газоконденсатной смеси, кмоль; $n_{\text{ГКС}}$ – количество газоконденсатной смеси, кмоль; 100 – коэффициент для перевода долей в проценты⁸.

Формат представления компонентного состава добываемого сырья определяется целями проводимых аналитических исследований. Для решения большинства задач, таких как предварительная оценка, достаточно использовать упрощенный формат, ограничивающийся компонентами C_1 – C_5 и C_{6+} или C_1 – C_{12} , C_{13+} . При необходимости более детальное распределение фракций тяжелой жидкой части конденсата может быть получено с помощью моделирования. Однако при проектировании, планировании и прогнозировании перспективного развития систем транспорта и переработки жидких углеводородов требуется более точ-

⁸ ГОСТ Р 57851.4–2017. Смесь газоконденсатная. Часть 4. Расчет компонентно-фракционного состава. М.: Стандартинформ, 2017. 50 с.



Таблица 2. Компонентно-фракционные составы глубинных проб пластового газа, дифференцированные по температуре кипения
Table 2. Component-fractional compositions of boiling temperature-differentiated downhole samples of formation gas

Компонент и фракция	Температура кипения, °C	Контейнер					
		3365		3542		5092	
		Молярная масса, г/моль					
		19,09		19,14		19,36	
		Массовая доля, %	Мольная доля, %	Массовая доля, %	Мольная доля, %	Массовая доля, %	Мольная доля, %
N ₂	-195,8	3,1525	2,1482	3,2334	2,2096	3,1316	2,1640
CO ₂	-78,5	0,2215	0,0961	0,3605	0,1568	0,2655	0,1168
CH ₄	-161,5	75,5838	89,9349	75,2905	89,8440	74,3807	89,7487
C ₂ H ₆	-88,6	7,3922	4,6927	7,3114	4,6548	7,2525	4,6688
C ₃ H ₈	-42.1	2,7047	1,1708	2,6721	1,1600	2,6547	1,1653
i-C ₄ H ₁₀	-11.7	0,7613	0,2500	0,7525	0,2478	0,7483	0,2492
n-C ₄ H ₁₀	-0.5	1,1171	0,3669	1,1058	0,3642	1,0995	0,3662
i-C ₅ H ₁₂	27.9	0,6804	0,1800	0,6733	0,1787	0,6753	0,1812
n-C ₅ H ₁₂	36.1	0,5338	0,1412	0,5291	0,1404	0,5327	0,1429
F 45–60	52.5	0,1233	0,0272	0,1219	0,0270	0,1247	0,0279
F 60–70	65	0,8000	0,1662	0,7998	0,1666	0,8257	0,1739
F 70–80	75	0,0453	0,0090	0,0483	0,0096	0,0482	0,0097
F 80–90	85	0,1265	0,0240	0,1358	0,0258	0,1345	0,0258
F 90–100	95	0,6094	0,1103	0,6326	0,1148	0,6818	0,1251
F 100–110	105	0,1615	0,0279	0,1691	0,0293	0,1845	0,0324
F 110–120	115	0,3895	0,0644	0,3954	0,0656	0,4613	0,0774
F 120–130	125	0,1967	0,0311	0,1999	0,0317	0,2361	0,0378
F 130–140	135	0,1557	0,0235	0,1592	0,0241	0,1887	0,0289
F 140–150	145	0,2763	0,0400	0,2800	0,0407	0,3388	0,0498
F 150–160	155	0,2353	0,0327	0,2370	0,0330	0,2891	0,0407
F 160–170	165	0,2684	0,0358	0,2693	0,0360	0,3285	0,0444
F 170–180	175	0,2719	0,0348	0,2734	0,0351	0,3314	0,0430
F 180–190	185	0,2366	0,0290	0,2367	0,0291	0,2869	0,0357
F 190–200	195	0,2617	0,0309	0,2611	0,0309	0,3165	0,0379
F 200–210	205	0,2485	0,0282	0,2470	0,0281	0,3001	0,0345
F 210–220	215	0,3122	0,0341	0,3118	0,0341	0,3744	0,0414
F 220–230	225	0,2752	0,0288	0,2748	0,0289	0,3285	0,0349
F 230–240	235	0,3497	0,0353	0,3495	0,0353	0,4150	0,0424
F 240–250	245	0,2844	0,0276	0,2853	0,0278	0,3362	0,0331
F 250–260	255	0,3231	0,0302	0,3255	0,0305	0,3811	0,0362
F 260–270	265	0,2680	0,0242	0,2722	0,0246	0,3160	0,0289
F 270–280	275	0,2714	0,0236	0,2784	0,0243	0,3211	0,0283
F 280–290	285	0,2277	0,0191	0,2363	0,0199	0,2704	0,0230
F 290–300	295	0,1709	0,0138	0,1798	0,0146	0,2040	0,0168
F 300–310	305	0,1890	0,0148	0,2011	0,0158	0,2257	0,0179
F 310–320	315	0,1639	0,0124	0,1774	0,0134	0,1980	1,5 E-02
F 320–330	325	0,1048	0,0076	0,1155	0,0084	0,1291	9,6 E-03
F 330–340	335	0,1098	0,0077	0,1230	0,0087	0,1371	9,8 E-03
F 340–350	345	0,0880	0,0060	0,1000	0,0068	0,1129	7,8 E-03
F 350–360	355	0,0853	0,0056	0,0984	0,0065	0,1121	7,5 E-03
F 360–370	365	0,0550	0,0035	0,0647	0,0041	0,0746	4,8 E-03
F 370–380	375	0,0532	0,0033	0,0634	0,0039	0,0741	4,6 E-03
F 380–390	385	0,0400	0,0024	0,0485	0,0029	0,0573	3,5 E-03
F 390–400	395	0,0278	0,0016	0,0343	0,0020	0,0410	2,4 E-03
F 400–410	405	0,0172	9,6 E-04	0,0217	0,0012	0,0262	1,5 E-03
F 410–420	415	0,0103	5,6 E-04	0,0136	7,4 E-04	0,0163	8,9 E-04
F 420–430	425	0,0077	4,0 E-04	0,0105	5,5 E-04	0,0119	6,3 E-04
F 430–440	435	0,0056	2,8 E-04	0,0080	4 E-04	0,0086	4,4 E-04
F 440–450	445	0,0034	1,7 E-04	0,0053	2,6 E-04	0,0058	2,9 E-04



F 450–460	455	0,0017	8,2 E-05	0,0033	1,6 E-04	0,0033	1,6 E-04
F 460–470	465	6,0 E-04	2,8 E-05	0,0020	9,1 E-05	0,0015	6,9 E-05
F 470–480	475	–	–	6,2 E-04	2,8 E-05	4,9 E-04	2,2 E-05
Сумма		100	100	100	100	100	100

Таблица 3. Компонентно-фракционные составы глубинных проб пластового газа, дифференцированные по количеству атомов углерода

Table 3. Component-fractional compositions of carbon atom number-differentiated downhole samples of formation gas

Компонент и фракция	Темпера- тура кипения, °C	Контейнер					
		3365		3542		5092	
		Молярная масса, г/моль					
		19,09		19,14		19,36	
		Массовая доля, %	Мольная доля, %	Массовая доля, %	Мольная доля, %	Массовая доля, %	Мольная доля, %
N ₂	-195,8	3,1525	2,1479	3,2334	2,2094	3,1316	2,1637
CO ₂	-78,5	0,2215	0,0961	0,3605	0,1568	0,2655	0,1168
CH ₄	-161,5	75,5838	89,9249	75,2905	89,8339	74,3807	89,7378
C ₂ H ₆	-88,6	7,3922	4,6922	7,3114	4,6543	7,2525	4,6682
C ₃ H ₈	-42,1	2,7047	1,1707	2,6721	1,1599	2,6547	1,1652
i-C ₄ H ₁₀	-11,7	0,7613	0,2500	0,7525	0,2478	0,7483	0,2492
n-C ₄ H ₁₀	-0,5	1,1171	0,3669	1,1058	0,3642	1,0995	0,3661
i-C ₅ H ₁₂	27,9	0,6804	0,1800	0,6733	0,1786	0,6753	0,1812
n-C ₅ H ₁₂	36,1	0,5338	0,1412	0,5291	0,1404	0,5327	0,1429
F C ₆	52,5	0,8044	0,1775	0,8027	0,1776	0,8274	0,1851
F C ₇	83,8	0,8007	0,1524	0,8324	0,1589	0,8760	0,1691
F C ₈	112,2	0,7833	0,1312	0,8027	0,1349	0,9160	0,1556
F C ₉	138,4	0,5102	0,0761	0,5189	0,0776	0,6225	0,0941
F C ₁₀	162,7	0,6005	0,0807	0,6036	0,0814	0,7356	0,1003
F C ₁₁	185,2	0,5483	0,0672	0,5490	0,0675	0,6651	0,0827
F C ₁₂	206,3	0,5520	0,0623	0,5498	0,0623	0,6653	0,0762
F C ₁₃	226	0,5815	0,0607	0,5808	0,0608	0,6934	0,0734
F C ₁₄	244,7	0,5585	0,0543	0,5600	0,0546	0,6605	0,0651
F C ₁₅	262,3	0,4971	0,0453	0,5034	0,0460	0,5862	0,0542
F C ₁₆	279	0,4201	0,0360	0,4327	0,0372	0,4976	0,0433
F C ₁₇	294,9	0,2780	0,0225	0,2922	0,0237	0,3315	0,0272
F C ₁₈	310,1	0,2705	0,0208	0,2901	0,0223	0,3245	0,0253
F C ₁₉	324,6	0,1579	0,0115	0,1737	0,0127	0,1941	0,0144
F C ₂₀	338,4	0,1403	0,0098	0,1578	0,0110	0,1764	0,0125
F C ₂₁	351,8	0,1133	0,0075	0,1301	0,0087	0,1479	0,0100
F C ₂₂	364,6	0,0725	0,0046	0,0850	0,0054	0,0979	0,0063
F C ₂₃	376,9	0,0624	0,0038	0,0746	0,0046	0,0872	0,0054
F C ₂₄	388,8	0,0409	0,0024	0,0500	0,0030	0,0593	0,0035
F C ₂₅	400,3	0,0249	0,0014	0,0311	0,0018	0,0373	0,0021
F C ₂₆	411,3	0,0134	7,3 E-04	0,0174	9,6 E-04	0,0210	0,0012
F C ₂₇	422,1	0,0087	4,6 E-04	0,0118	6,3 E-04	0,0137	7,3 E-04
F C ₂₈	432,5	0,0063	3,2 E-04	0,0088	4,5 E-04	0,0096	5,0 E-04
F C ₂₉	442,5	0,0039	1,9 E-04	0,0059	2,9 E-04	0,0064	3,2 E-04
F C ₃₀	452,3	0,0021	9,9 E-05	0,0036	1,7 E-04	0,0038	1,9 E-04
F C ₃₁	461,8	8,6 E-04	4 E-05	0,0022	1 E-04	0,0019	8,7 E-05
F C ₃₂	471	1,4 E-04	6,5 E-06	0,0010	4,7 E-05	7,3 E-04	3,4 E-05
F C ₃₃	480	–	–	1,7 E-04	7,9 E-06	1,6 E-04	7,2 E-06
Сумма		100	100	100	100	100	100

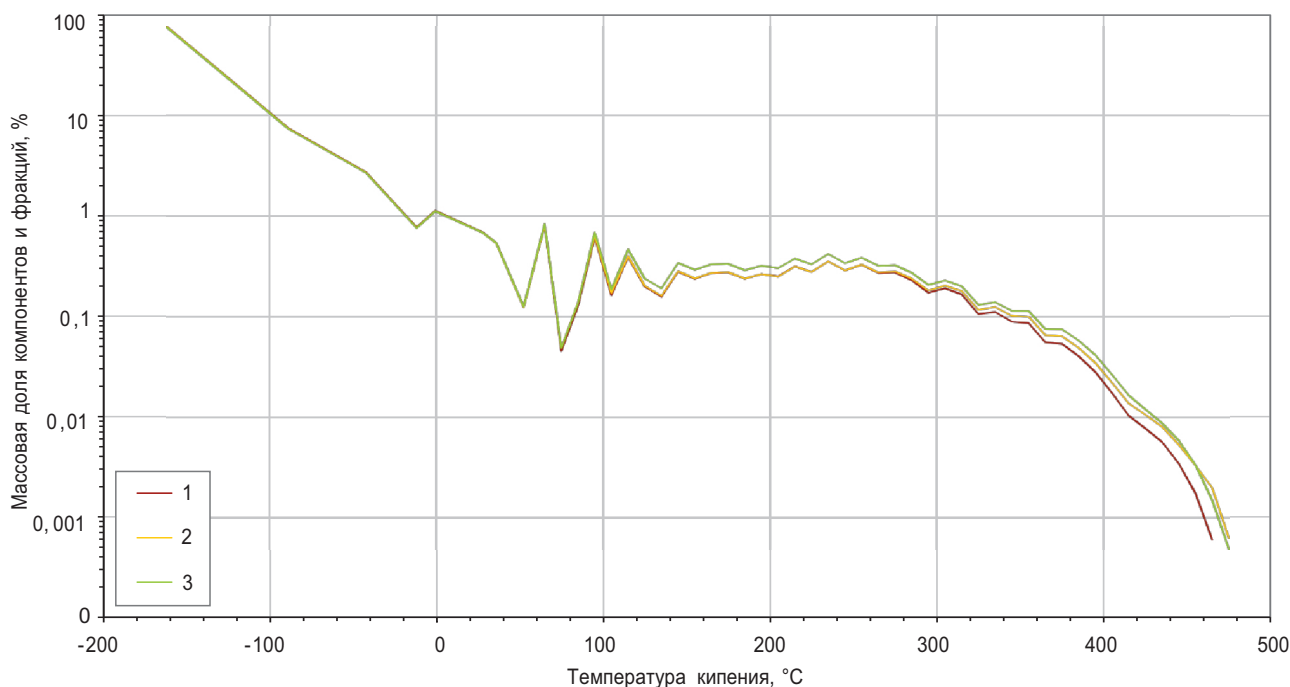


Рис. 4. Компонентно-фракционные составы глубинных проб пластового газа:

1 – контейнер № 3365; 2 – контейнер № 3542; 3 – контейнер № 5092

Fig. 4. Component-fractional compositions of formation gas downhole samples:

1 – container no. 3365; 2 – container no. 3542; 3 – container no. 5092

ная информация о компонентно-фракционном составе сырья. В таких случаях необходимо получать детальное представление состава до отдельных углеводородов C_5 и далее узкими фракциями до C_{44} или температур кипения порядка 500 °C и выше [20].

Составы всех исследованных газов представлены в двух видах: в развернутой компонентно-фракционной форме (когда неуглеводородные компоненты и углеводороды от метана до пентанов представлены индивидуально, а углеводороды тяжелее пентанов сгруппированы в узкие десятиградусные фракции, ранжированные по температурам кипения углеводородов (см. табл. 2)) и в стандартной форме (когда компоненты тяжелее пентана представляются в виде фракций по числу атомов углерода с более или менее тяжелым остатком (см. табл. 3)).

Результаты исследования показали, что компонентно-фракционный состав пластового флюида Ковыктинского газоконденсатного месторождения характеризуется высоким содержанием метана и легких углеводородов. Анализ физических свойств подтверждает возможность эффективного использования существующих технологий для добычи газа. Полученные данные подчеркивают важность комплексного подхода к анализу пластовых флюидов в условиях современного нефтега-

зового производства и могут служить основой для дальнейших исследований в области разработки газоконденсатных месторождений.

Закключение

При исследовании Ковыктинского месторождения проводились лабораторные физико-химические и аналитические исследования глубинных проб пластового флюида. В ходе работы было определено, что по фазовому составу пробы являются пластовым газом.

Для пластового газа была проведена дегазация, определены подробный компонентно-фракционный состав газа дегазации и дегазированного конденсата, экспериментально показано влияние давления и температуры на плотность и вязкость проб пластового газа. В процессе исследования был детально рассчитан состав пластового газа на основе составов газа дегазации и дегазированного конденсата по принципу материального баланса.

Результаты расчетов компонентно-фракционного состава добываемого пластового флюида Ковыктинского газоконденсатного месторождения предоставляют важную информацию для оптимизации процессов его разработки и могут быть использованы для повышения эффективности добычи углеводородов на данном месторождении.



Список источников

1. Кокарев П.Н., Сердюкова В.А., Диких И.А. Особенности строения пород-коллекторов парфёновского горизонта Ковыктинской зоны газонакопления по материалам геофизического исследования скважин и результатам испытаний скважин // Известия Сибирского отделения секции наук о Земле Российской академии естественных наук. Геология, разведка и разработка месторождений полезных ископаемых. 2018. Т. 41. № 3. С. 78–92. <https://doi.org/10.21285/2541-9455-2018-41-3-78-92>. EDN: YMMCOD.
2. Касперович А.Г., Крайн Д.Р., Омельченко О.А., Мурыхных Н.А., Рычков Д.А., Фатеев Д.Г. [и др.]. Проблемы и возможности совершенствования исследования и моделирования газоконденсатных флюидов // Вести газовой науки. 2021. № 1. С. 149–156. EDN: BAVWPV.
3. Булейко В.М., Григорьев Б.А., Овсяникова М.С. Исследование фазового поведения углеводородных смесей с низким конденсатным фактором // Вести газовой науки. 2017. № 2. С. 4–13. EDN: ZIDUOJ.
4. Мавлетдинов М.Г. Оценка типа пластового флюида, добываемого из скважин газонефтяной залежи, по компонентному составу проб газа // Актуальные проблемы нефти и газа. 2022. № 2. С. 162–174. <https://doi.org/10.29222/impng.2078-5712.2022-37.art12>. EDN: MYVVRU.
5. Арыстанбекова С.А., Волынский А.Б. Сравнительная характеристика единиц концентрации применительно к стандартным образцам для газохроматографического анализа углеводородных проб // Стандартные образцы. 2014. № 4. С. 5–9. EDN: TKUHSF.
6. Арыстанбекова С.А., Волынский А.Б. Современные подходы к определению углеводородного состава газового конденсата // Газовая промышленность. 2019. № 8. С. 40–47. EDN: XOTPDA.
7. Мешков А.В., Осипов Е.В. Особенности анализа состава сжиженных углеводородных газов. Разработка стандартных образцов сжиженных углеводородных газов в баллонах постоянного давления // Стандартные образцы. 2014. № 1. С. 62–65. EDN: SLTAHJ.
8. Назыров М.Р., Еремеева С.В., Валеева О.Н., Швеиц А.Н., Овчаренко А.И. Особенности учета углеводородов C_{5+6} в добываемой пластовой смеси Оренбургского нефтегазоконденсатного месторождения // Газовая промышленность. 2017. № 12. С. 52–56. EDN: ZXGUKF.
9. Арыстанбекова С.А., Волынский А.Б., Прудников И.А. Современные методы газохроматографического анализа нестабильного газового конденсата. М.: Изд-во ООО «Газпром ВНИИГАЗ», 2011. 180 с. EDN: QKKKRX.
10. Вахирев Д.А., Брук А.И., Фуглина С.А. Объемно-хроматографический метод анализа смесей углеводородов в газовой фазе // Труды Комиссии по аналитической химии. 1955. Т. 6. № 9. С. 137.
11. Юрил Я.Э., Леонтьев С.А., Роголев М.С. Дегазация нестабильных жидких углеводородов // Экспозиция Нефть Газ. 2016. № 7. С. 50–53. EDN: XANSEV.
12. Егзарьянц С.В. Хроматографические методы анализа нефтепродуктов // Вестник Московского университета. Серия 2: Химия. 2009. Т. 50. № 2. С. 75–99. EDN: KWUKRP.
13. Вигдергауз М.С. Газовая хроматография как метод исследования нефти: монография. М.: Наука, 1973. 256 с. EDN: YNCSHZ.
14. Trestianu S., Zilioli G., Sironi A., Saravalle C., Munari F., Galli M., et al. Automatic simulated distillation of heavy petroleum fractions up to 800 °C TBP by capillary gas chromatography. Part I: Possibilities and limits of the method // Journal of High Resolution Chromatography. 1985. Vol. 8. Iss. 11. P. 771–781. <https://doi.org/10.1002/jhrc.1240081113>.
15. Lipsky S.R., Duffy M.L. High temperature gas chromatography: the development of new aluminum clad flexible fused silica glass capillary columns coated with thermostable nonpolar phases: Part 2 // Journal of High Resolution Chromatography. 1986. Vol. 9. Iss. 12. P. 725–730. <https://doi.org/10.1002/jhrc.1240091203>.
16. Curvers J., van den Engel P. Gas chromatographic method for simulated distillation up to a boiling point of 750 °C using temperature programmed injection and high temperature fused silica wide-bore columns // Journal of High Resolution Chromatography. 1989. Vol. 12. Iss. 1. P. 16–22. <https://doi.org/10.1002/jhrc.1240120106>.
17. Firor R.L., Philips R.J. Fused silica columns for high-temperature simulated distillation // Journal of High Resolution Chromatography. 1989. Vol. 12. Iss. 3. P. 181–183. <https://doi.org/10.1002/jhrc.1240120316>.
18. Subramanian M., Deo M.D., Hanson F.V. Compositional analysis of bitumen and bitumen-derived products // Journal of Chromatographic Science. 1996. Vol. 34. Iss. 1. P. 20–26. <https://doi.org/10.1093/chromsci/34.1.20>.
19. Nazeri M., Chapoy A., Valtz A., Coquelet C., Tohidi B. New experimental density data and derived thermophysical properties of carbon dioxide – sulphur dioxide binary mixture (CO_2-SO_2) in gas, liquid and supercritical phases from 273 K to 353 K and at pressures up to 42 MPa // Fluid Phase Equilibria. 2017. Vol. 454. P. 64–77. <https://doi.org/10.1016/j.fluid.2017.09.014>.
20. Нестеренко А.Н., Касперович А.Г., Омельченко О.А., Рычков Д.А., Якушенко Е.А. Практический опыт, проблемы и пути совершенствования методов определения и прогноза составов добываемого сырья газоконденсатных месторождений для адекватного моделирования его промысловой подготовки, транспорта и переработки // Вести газовой науки. 2016. № 4. С. 27–36. EDN: YKOWOF.

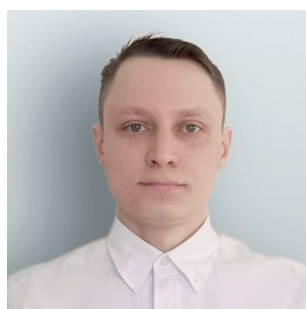
References

1. Kokarev P.N., Serdyukova V.A., Dikikh I.A. Structural features of Parfenovsky horizon reservoir formations of the Kovykta gas condensate field by well logging data and well testing results. *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*. 2018;41(3):78-92. (In Russ.). <https://doi.org/10.21285/2541-9455-2018-41-3-78-92>. EDN: YMMCOD.



2. Kasperovich A.G., Krayn D.R., Omelchenko O.A., Murykhnykh N.A., Rychkov D.A., Fateyev D.G., et al. Challenges and capabilities to perfect studying and modelling of gas-condensate fluids. *Vesti gazovoy nauki*. 2021;1:149-156. (In Russ.). EDN: BAVWPV.
3. Buleiko V.M., Grigoryev B.A., Ovsyanikova M.S. Investigation of phase behavior of hydrocarbon mixtures with low condensate ratios. *Vesti gazovoy nauki*. 2017;2:4-13. (In Russ.). EDN: ZIDUQJ.
4. Mavletdinov M.G. Assessment of the type of reservoir fluid extracted from wells of a gas and oil deposit by the component composition of gas samples. *Actual Problems of Oil and Gas*. 2022;2:162-174. (In Russ.). <https://doi.org/10.29222/ipng.2078-5712.2022-37.art12>. EDN: MYVVRU.
5. Arystanbekova S.A., Volynskii A.B. Comparative characteristic of concentration units relating to reference materials for gas chromatography analysis of hydrocarbon samples. *Measurement Standards. Reference Materials*. 2014;4:5-9. (In Russ.). EDN: TKUHSF.
6. Arystanbekova S.A., Volynskii A.B. Modern approaches to the determination of hydrocarbon composition of gas condensate. *Gazovaya promyshlennost'*. 2019;8:40-47. (In Russ.). EDN: XOTPD.
7. Meshkov A.V., Osipov E.V. The distinctive features of the analysis of liquefied hydrocarbon gases composition. Development of reference materials of liquefied hydrocarbon gases in constant pressure cylinders. *Measurement Standards. Reference Materials*. 2014;1:62-65. (In Russ.). EDN: SLTAHJ.
8. Nazarov M.P., Yermeeva S.V., Valeeva O.N., Shvets A.N., Ovcharenko A.I. Features of accounting of the C_{5+H} hydrocarbons in the extracted formation fluid of the Orenburgskoe oil and gas condensate field. *Gazovaya promyshlennost'*. 2017;12:52-56. (In Russ.). EDN: ZXGUKE.
9. Arystanbekova S.A., Volynskii A.B., Prudnikov I.A. *Modern methods of gas chromatographic analysis of unstable gas condensate*. Moscow: PJSC Gazprom VNIIGAZ; 2011, 180 p. (In Russ.). EDN: QKKKPX.
10. Vyakhirev D.A., Bruk A.I., Fuglina C.A. Volumetric chromatographic method for the analysis of hydrocarbon mixtures in gas phase. *Trudy Komissii po analiticheskoi khimii*. 1955;6(9):137. (In Russ.).
11. Yuril Ya.E., Leontiev S.A., Rogalev M.S. Degassing of unstable liquid hydrocarbons. *Exposition Oil Gas*. 2016;7:50-53. (In Russ.). EDN: XANSEV.
12. Yegazariants S.V. Chromatographic methods for the petroleum products analysis. *Vestnik Moskovskogo universiteta. Seriya 2: Khimiya*. 2009;50(2):75-99. (In Russ.). EDN: KWUKRP.
13. Vigdergauz M.S. *Gas chromatography as a method for the investigation of petroleum*. Moscow: Nauka; 1973, 256 p. (In Russ.). EDN: YNCSHZ.
14. Trestianu S., Zilioli G., Sironi A., Saravalle C., Munari F., Galli M., et al. Automatic simulated distillation of heavy petroleum fractions up to 800 °C TBP by capillary gas chromatography. Part I: Possibilities and limits of the method. *Journal of High Resolution Chromatography*. 1985;8(11):771-781. <https://doi.org/10.1002/jhrc.1240081113>.
15. Lipsky S.R., Duffy M.L. High temperature gas chromatography: the development of new aluminum clad flexible fused silica glass capillary columns coated with thermostable nonpolar phases: Part 2. *Journal of High Resolution Chromatography*. 1986;9(12):725-730. <https://doi.org/10.1002/jhrc.1240091203>.
16. Curvers J., van den Engel P. Gas chromatographic method for simulated distillation up to a boiling point of 750 °C using temperature programmed injection and high temperature fused silica wide-bore columns. *Journal of High Resolution Chromatography*. 1989;12(1):16-22. <https://doi.org/10.1002/jhrc.1240120106>.
17. Firor R.L., Philips R.J. Fused silica columns for high-temperature simulated distillation. *Journal of High Resolution Chromatography*. 1989;12(3):181-183. <https://doi.org/10.1002/jhrc.1240120316>.
18. Subramanian M., Deo M.D., Hanson F.V. Compositional analysis of bitumen and bitumen-derived products. *Journal of Chromatographic Science*. 1996;34(1):20-26. <https://doi.org/10.1093/chromsci/34.1.20>.
19. Nazeri M., Chapoy A., Valtz A., Coquelet C., Tohidi B. New experimental density data and derived thermophysical properties of carbon dioxide – sulphur dioxide binary mixture (CO_2-SO_2) in gas, liquid and supercritical phases from 273 K to 353 K and at pressures up to 42 MPa. *Fluid Phase Equilibria*. 2017;454:64-77. <https://doi.org/10.1016/j.fluid.2017.09.014>.
20. Nesterenko A.N., Kasperovich A.G., Omelchenko O.A., Rychkov D.A., Yakushenko Ye.A. Practical experience, issues and ways to perfect methods for makeup and prediction of primary products composition of gas- condensate fields in order to simulate their field treatment, transfer and processing. *Vesti gazovoy nauki*. 2016;4:27-36. (In Russ.). EDN: YKOWOF.

Информация об авторе / Information about the author



Белькович Михаил Леонидович,
аспирант,
институт «Сибирская школа геонаук»,
Иркутский национальный исследовательский технический университет,
г. Иркутск, Россия,
✉ belkovichmikhail@yandex.ru
<https://orcid.org/0009-0002-9979-7445>
Mikhail L. Belkovich,
Postgraduate Student,
Siberian School of Geosciences,
Irkutsk National Research Technical University,
Irkutsk, Russia,
✉ belkovichmikhail@yandex.ru
<https://orcid.org/0009-0002-9979-7445>

**Вклад автора / Contribution of the author**

Автор выполнил исследовательскую работу, на основании полученных результатов провел обобщение, подготовил рукопись к печати.

The author performed the research, made a generalization on the basis of the results obtained and prepared the copyright for publication.

Конфликт интересов / Conflict of interests

Автор заявляет об отсутствии конфликта интересов.

The author declares no conflicts of interests.

Автор прочитал и одобрил окончательный вариант рукописи.

The final manuscript has been read and approved by the author.

Информация о статье / Information about the article

Статья поступила в редакцию 03.05.2025; одобрена после рецензирования 29.05.2025; принята к публикации 08.06.2025.

The article was submitted 03.05.2025; approved after reviewing 29.05.2025; accepted for publication 08.06.2025.



ГОРНОПРОМЫШЛЕННАЯ И НЕФТЕГАЗОПРОМЫСЛОВАЯ ГЕОЛОГИЯ, ГЕОФИЗИКА, МАРКШЕЙДЕРСКОЕ ДЕЛО И ГЕОМЕТРИЯ НЕДР

Научная статья

УДК 627.222.5:528.8.04

EDN: MDZVJW

DOI: 10.21285/2686-9993-2025-48-2-249-259



Закономерности развития процесса переработки берегов равнинных водохранилищ

М.В. Степанова^{a,✉}, В.Н. Экзарьян^b

^{a,b}Российский государственный геологоразведочный университет имени Серго Орджоникидзе, Москва, Россия

Резюме. Проблема активизации переработки берегов водохранилищ равнинного типа на сегодняшний день является актуальной, поскольку ежегодно в опасную зону попадают населенные пункты, сельскохозяйственные угодья, лесные массивы и промышленные предприятия. Современная ситуация в области изучения переработки берегов водохранилищ требует усовершенствования существующих и создания новых методов. Целью выполненного исследования являлось выявление наиболее значимых факторов и условий, определяющих интенсивность процесса переработки берегов водохранилищ. В процессе работы были собраны и проанализированы данные предыдущих исследований, проведены натурные наблюдения берегов Волгоградского водохранилища, опрос местного населения на предмет проявления и степени активности процесса переработки берегов, инженерно-геологическое районирование прибрежной территории, применены методы расчетов суммарной энергии волнения Е.Г. Качугина и Н.Е. Кондратьева. Для обработки полученных материалов использовались методы математической статистики. Предметом исследования являлся процесс переработки берегов водохранилищ, объектом – прибрежная зона Волгоградского водохранилища. Были определены основные закономерности развития переработки берегов Волгоградского водохранилища и конкретизированы факторы, влияющие на этот процесс (факторы-условия, факторы-процессы). Наиболее простые временные закономерности процесса переработки берегов представлены в виде кинематической модели. По результатам расчетов, базирующихся на применении корреляционного анализа, наибольшее влияние на процесс переработки берегов Волгоградского водохранилища оказали энергия волн, колебание уровня воды, показатель размываемости горных пород, слагающих береговой склон. Полученные в ходе исследования данные будут использованы для дальнейшего моделирования и прогнозирования процесса переработки берегов Волгоградского водохранилища.

Ключевые слова: переработка берегов водохранилищ, закономерности развития процесса, факторы-условия, факторы-процессы, методы математической статистики

Для цитирования: Степанова М.В., Экзарьян В.Н. Закономерности развития процесса переработки берегов равнинных водохранилищ // Науки о Земле и недропользование. 2025. Т. 48. № 2. С. 249–259. <https://doi.org/10.21285/2686-9993-2025-48-2-249-259>. EDN: MDZVJW.

APPLIED MINING AND PETROLEUM FIELD GEOLOGY, GEOPHYSICS, MINE SURVEYING AND SUBSOIL GEOMETRY

Original article

Development regularities of plain reservoir shore marginal erosion

Maria V. Stepanova^{a,✉}, Vladimir N. Ekzarian^b

^{a,b}Sergo Ordzhonikidze Russian State University for Geological Prospecting, Moscow, Russia

Abstract. The problem of intensified marginal erosion of lowland reservoir shores is relevant today, since settlements, agricultural lands, forests and industrial enterprises fall into the danger zone every year. The current situation in the field of studying the marginal erosion of reservoir shores requires to improve the existing methods and to create new ones. The purpose of the study performed is to identify the most significant factors and conditions that determine the intensity of the marginal erosion of reservoir shores. The research involves collection and analysis of data from previous studies, field observations of the Volgograd reservoir shores, a survey of the local population regarding the manifestation and activity degree of marginal erosion, as well as engineering and geological zoning of the coastal area. E.G. Kachugin and N.E. Kondratiev's methods for calculating the total energy of waves are applied. The obtained results have been processed using the methods of mathematical statistics. The subject of the study is marginal erosion of the reservoir shores, the



object of the study is the coastal area of the Volgograd reservoir. The main development patterns of marginal erosion of the Volgograd reservoir shores have been identified and the factors influencing this process (condition factors, process factors) have been specified. The simplest temporal patterns of the marginal erosion process are presented in the form of a kinematic model. According to the calculation results, which are based on the correlation analysis, the wave energy, water level fluctuation, and the erosion index of rocks composing the coastal slope had the greatest impact on the process of marginal erosion of Volgograd reservoir shores. The data obtained during the study will be used for further modeling and forecasting of the marginal erosion process of the Volgograd reservoir shores.

Keywords: marginal erosion of reservoir shores, process development regularities, condition factors, process factors, methods of mathematical statistics

For citation: Stepanova M.V., Ekzaryan V.N. Development regularities of plain reservoir shore marginal erosion. *Earth sciences and subsoil use*. 2025;48(2):249-259. (In Russ.). <https://doi.org/10.21285/2686-9993-2025-48-2-249-259>. EDN: MDZVJW.

Введение

Ежегодно в связи с активным проявлением процесса переработки берегов увеличивается объем так называемых потерянных земель вблизи береговой зоны крупных водохранилищ. Именно поэтому детальное изучение и моделирование данного процесса, а также создание более совершенных методов прогноза являются в настоящее время актуальными задачами инженерной геологии [1, 2], что подтверждается многочисленными исследованиями [3–7]. Н.В. Коломенский под переработкой берегов водохранилищ понимает процесс отступления берегов искусственных водоемов вглубь суши вследствие волнового воздействия¹. Перед авторами настоящей статьи стояла задача определить закономерности процесса переработки берегов водохранилищ для оптимизации ведения мониторинговых наблюдений и выбора методов моделирования и прогнозирования процесса.

Переработка берегов водохранилищ является полифакторным, неоднородным в пространстве и нестационарным во времени процессом, который характеризуется кумулятивным эффектом запаздывания по отношению к воздействию факторов, что особенно ощутимо внутри годового цикла. Самым важным и принципиальным результатом изучения переработки берегов водохранилищ являлось уяснение стохастической природы процесса.

Основы изучения факторов и процесса переработки берегов водохранилищ были заложены в конце 1920-х – начале 1930-х гг. академиком Ф.П. Саваренским [8]. С середины 1930-х гг. в связи с интенсивным строительством гидроэлектростанций и созданием водохранилищ были развернуты широкие исследования факторов и процесса переработ-

ки берегов водохранилищ, начата разработка количественных методов прогноза и управления этим процессом. Особенно интенсивными и результативными были исследования в 1950-х и 1970-х гг.

К сожалению, с 1990-х гг. по настоящее время ведутся бессистемные режимные наблюдения за процессом переработки берегов водохранилищ Волжского каскада [9]. Отсутствие данных о проявлении и активности исследуемого процесса в ближайшем будущем может привести к негативным последствиям в отношении состояния окружающей природной среды прибрежных территорий.

Материалы и методы исследования

Изучение процесса переработки берегов проводилось в пределах Волгоградского водохранилища. Основной целью являлось определение закономерностей развития процесса переработки берегов водохранилищ. Для достижения поставленной цели были собраны и проанализированы архивные данные режимных (мониторинговых) наблюдений, выполнено инженерно-геологическое районирование прибрежной территории Волгоградского водохранилища и изучен комплекс факторов, обуславливающих активизацию исследуемого процесса [10].

Системный подход при изучении переработки берегов позволил выявить основные факторы-процессы и факторы-условия, определяющие степень активности процесса. В ходе работы было выявлено, что функционирование и эволюция водохранилищ, а также развитие процесса переработки берегов определяются регионально-геологическими, зонально-климатическими и техногенными факторами [11, 12] (рис. 1).

¹ Коломенский Н.В. Инженерная геология: учебник. М.: Госгеолтехиздат, 1956. Ч. 2. 320 с.

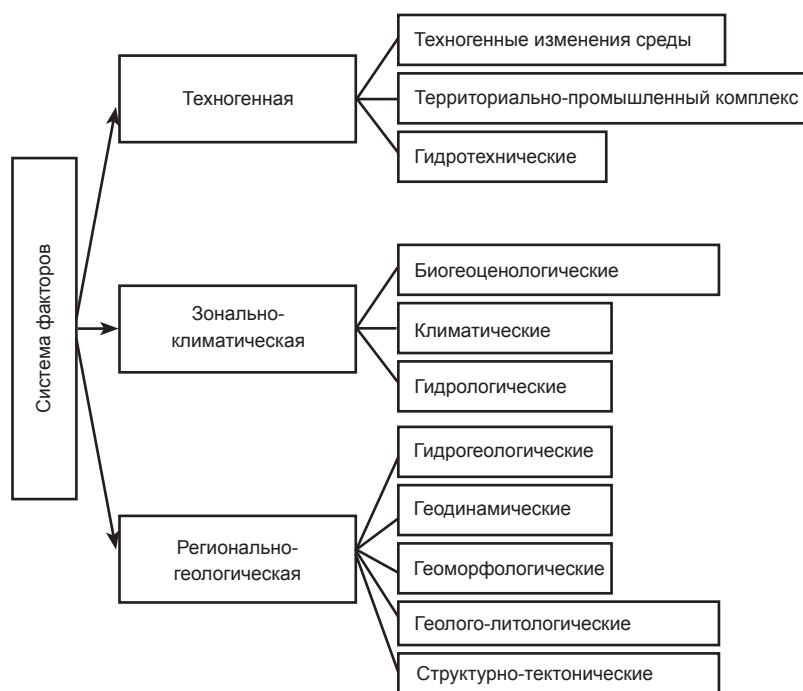


Рис. 1. Классификационная схема системы факторов, определяющих степень активности процесса переработки берегов [12]

Fig. 1. Classification diagram of the system of factors determining the activity degree of marginal erosion [12]

Регионально-геологические условия водохранилища обусловлены принадлежностью к тектоническому элементу земной коры – платформе или геосинклинали, к определенной геологической формации и соответственно литологическим условиям ложа и берегов водохранилища, а также к геоморфологическим, гидрогеологическим, эндо- и экзогеодинамическим условиям региона. Так, например, является очевидным различие в интенсивности процесса переработки берегов платформенных (равнинных) и орогенных (горных) водохранилищ, берега которых сложены характерными парагенетическими комплексами магматических, метаморфических и осадочных пород, определяющих наряду с неотектоникой и современной геодинамикой геоморфологические особенности берегов водохранилища.

Зонально-климатическая характеристика водохранилища определяет его гидрологические и волноэнергетические особенности, климатический режим территории и характер развитых почв и биогеоценозов. Общеизвестным является тот факт, что большое значение для процесса переработки берегов имеют особенности уровня, гидродинамического, теплового, гидрохимического и биологического режимов водохранилища.

Техногенные условия характеризуются прежде всего целевым назначением водохранилища и структурой его водохозяйственного комплекса. Наряду с зонально-климатическими условиями контролируют его уровень режим (выбор нормального подпорного уровня, период регулирования и т. д.) и, следовательно, интенсивность процесса переработки берегов и инженерно-геодинамические условия в целом. В связи с проблемой комплексного использования водохранилищ и защиты геологической среды техногенный фактор как региональный механизм управления всем геодинамическим режимом в зоне влияния водохранилища становится особенно важным.

Поскольку переработка берегов водохранилищ представляет собой сложный в пространственно-временном и генетическом (полифакторном) аспектах инженерно-геологический процесс, закономерности развития процесса переработки берегов водохранилищ следует рассматривать в трех главных измерениях: пространственном, временном, генетическом, а также в их различных сочетаниях. Наиболее простые пространственно-временные закономерности процесса переработки берегов могут быть представлены в виде кинематической модели [12, 13]



$$y = \int (t),$$

где $y = (y_1, \dots, y_n)$ – вектор характеристик процесса; t – время; $\int$ – некоторая функция.

Основными характеристиками процесса переработки берегов водохранилищ являются: y_1 – величина переработки берега, или величина линейного отступления бровки берегового склона (клифа), м; y_2 – высота клифа, м; y_3 – объем размытых пород, м³; y_4 – мощность наносов на прибрежной отмели, м.

Фактор переработки берегов водохранилищ – это условие или процесс, который непосредственно или косвенно определяет возникновения и степень активности берегообрушения. По виду влияния факторы развития процесса переработки берегов водохранилищ условно можно разделить на факторы-условия и факторы-процессы [14, 15].

К факторам-условиям относятся геолого-литологическое строение берегов, геодинамические условия, морфология прибрежной части берегового склона (высота берегового склона (клифа), ширина надводной и подводной части отмели, крутизна отмели и др.). Факторы-процессы могут быть гидрогенными (волновой режим, колебание уровня воды в водохранилище, течения), климатическими (ветровой режим, режим атмосферных осадков, ледовый режим), прочие (судовое волнение, хозяйственная деятельность человека, растительность и др.). Факторы-процессы взаимодействуют друг с другом и по-разному влияют на переработку берегов водохранилища.

Процесс переработки берегов водохранилищ протекает в две стадии: неустановившегося и квазиустановившегося режима. На первой стадии размыв осуществляется в основном за счет ударно-механического, динамического воздействия волн. На второй стадии берегообрушение происходит за счет воздействия комплекса факторов и в значительной степени определяется геологическим строением берегового склона и сформированной надводной и подводной части отмели.

Энергия волн является основным фактором-процессом, определяющим интенсивность переработки берегов. Энергия волн представляет собой функцию от высоты волн, повторяемости волн и длины разгона волны. Для расчета энергии волнения используется метод Н.Е. Кондратьева [16].

Режим уровня определяется как естественными (водный баланс), так и искусственными причинами (попуски воды или форсирование уровня). Колебание уровня воды водохранилища в основном зависит от графика работы гидроэлектростанции и судоходства.

Результаты исследования и их обсуждение

Основными факторами-условиями, определяющими активность переработки берегов Волгоградского водохранилища, являются геолого-литологическое строение, высота береговых склонов, ширина надводной и подводной части отмели (чем больше ширина надводной и подводной части отмели, тем величина переработки берега меньше). На левом берегу Волгоградского водохранилища процесс переработки берегов проявляется наиболее активно, в отличие от правого берега (рис. 2, 3). В первую очередь это связано с геолого-литологическим строением: правый берег сложен полускальными коренными породами, а левый – песчано-глинистыми отложениями пойменных террас р. Волги [17].

По методу Е.Г. Качугина [18] были определены коэффициенты (показатели) размываемости пород. Районы распространения четвертичных отложений, занимающие левобережье Волгоградского водохранилища, обладают весьма низкой сопротивляемостью размыву. Правобережная территория представлена отложениями нижнего и среднего палеогена, нижнего и верхнего мела (это преимущественно вторая надпойменная терраса р. Волги (хвалынская), цоколь которой сложен довольно устойчивыми к размыву коренными породами) [19]. В ходе исследования рассмотрены две группы закономерностей процесса переработки берегов Волгоградского водохранилища:

1) изучение тесноты связи величины переработки берега с важнейшими факторами переработки;

2) оценка информативности гидрологических и геоморфологических факторов переработки берегов на участках с различным геолого-литологическим строением.

В расчеты входили характеристики процесса переработки берегов Волгоградского водохранилища и факторов, определяющих его интенсивность (величина линейного отступления берегового уступа, м; показатель размываемости горных пород, слагающих берега, м³/Дж; суммарная энергия волнения, Дж; по-



Рис. 2. Левый берег Волгоградского водохранилища (фотография М.В. Степановой)
Fig. 2. Left shore of the Volgograd reservoir (photo by M.V. Stepanova)



Рис. 3. Правый берег Волгоградского водохранилища (фотография М.В. Степановой)
Fig. 3. Right shore of the Volgograd reservoir (photo by M.V. Stepanova)



вторяемость уровня на нормальный подпорный уровень до 1 м/сут.; крутизна подводной отмели, град.; высота клифа, м; максимальная высота волн, м; повторяемость волн высотой более 0,5 м/сут.; амплитуда колебания уровня, м; угол подхода волн к берегу, град.).

По методу Н.Е. Кондратьева при выбранной высоте волны более 0,5 м/сут. на водохранилищах равнинного типа активизируется процесс переработки берегов и увеличивается энергия волн. Расчеты ветрового волнения включают повторяемость волн высотой более 0,5 м/сут.²

С помощью методов математической статистики рассчитывались коэффициенты парной корреляции, коэффициенты частной корреляции и критерии их значимости. Можно отметить хорошую коррелируемость показателя размываемости пород и высоты абразионного уступа. Отрицательные значения коэффициентов парной корреляции указывают на наличие обратной связи высоты берега и размываемости горных пород. Чем прочнее горные породы (меньше показатель размываемости), слагающие берега водохранилища, тем выше береговой уступ.

Наилучшую коррелируемость (по коэффициентам частной корреляции) при любой ширине отмели с величиной переработки берега проявляют характеристики уровня режима водохранилища. Колебание уровня воды в водохранилище является одним из основных факторов, влияющих на процесс переработки берегов. На его ведущую роль указывают почти все исследователи данного процесса. Роль колебаний уровня воды имеет двойное значение: амплитуда колебаний уровня определяет верхнюю и нижнюю границы возможного берегообрушения (изменяя глубину подводной части отмели, эти колебания увеличивают длительность и интенсивность процесса переработки); колебание уровня воды, создавая попеременное смачивание – высушивание горных пород, слагающих нижнюю часть берегового склона, снижает их сопротивляемость размыву и устойчивость склона в целом.

При рассмотрении указанных закономерностей породы, слагающие берега Волгоградского водохранилища, были разделены на три группы по литологическому составу: песчаные аллювиальные отложения сарпинской, хвалынской и хазарской террас р. Волги (a/Q_3spr , a/Q_3hv , a/Q_3hz); глинистые морские отложения хвалынской террасы р. Волги (mQ_3hv); песча-

ники, опоки, глины палеогенового и мелового возрастов. На рис. 4 показан геолого-литологический профиль, характерный для цокольной хвалынской террасы правобережья.

Для каждого типа пород были подобраны следующие характеристики факторов и процесса переработки берегов, которые можно считать представительными: величина переработки берега, м; энергия волнения, Дж; повторяемость волн высотой более 0,5 м/сут.; повторяемость уровня на нормальный подпорный уровень и выше, сут.; ширина подводной отмели, м.

Анализ полученных коэффициентов частной корреляции и коэффициентов множественной детерминации позволил сделать следующие выводы:

1. В легкоразмываемых песчаных породах (первой группы) наилучшая коррелируемость величины переработки берега за весь период существования водохранилища отмечается с энергией волнения и шириной отмели. Эти два показателя являются наиболее информативными факторами, определяющими активность переработки берегов в указанных условиях. Величина переработки берега в первые годы существования Волгоградского водохранилища составляла 8–15 м/год, в настоящее время процесс развивается квазистационарно (рис. 5) и составляет в среднем 25–30 м за 10 лет с учетом уровня режима.

2. Для второй группы пород наиболее информативными оказались повторяемость волн высотой более 0,5 м и повторяемость уровня на нормальный подпорный уровень и выше. Следовательно, на величину переработки берегов, сложенных глинистыми четвертичными отложениями, основное влияние оказывают так называемые рабочие волны высотой более 0,5 м. Колебания уровня воды в водохранилище приводит к снижению сопротивляемости горных пород размыву и интенсификации волнового воздействия. Н.В. Коломенский отмечал, что на величину и скорость размыва берегов, сложенных хвалынскими глинами, большое влияние оказывают процессы выветривания, которые значительно опережают процесс размыва [20]. Величина переработки берега для второй группы пород первые 10–20 лет составляла не более 7–8 м/год (рис. 6), в последующие годы не превышала 12–15 м (за последние 10 лет).

² Значения для расчетов брались в Росгидромете.

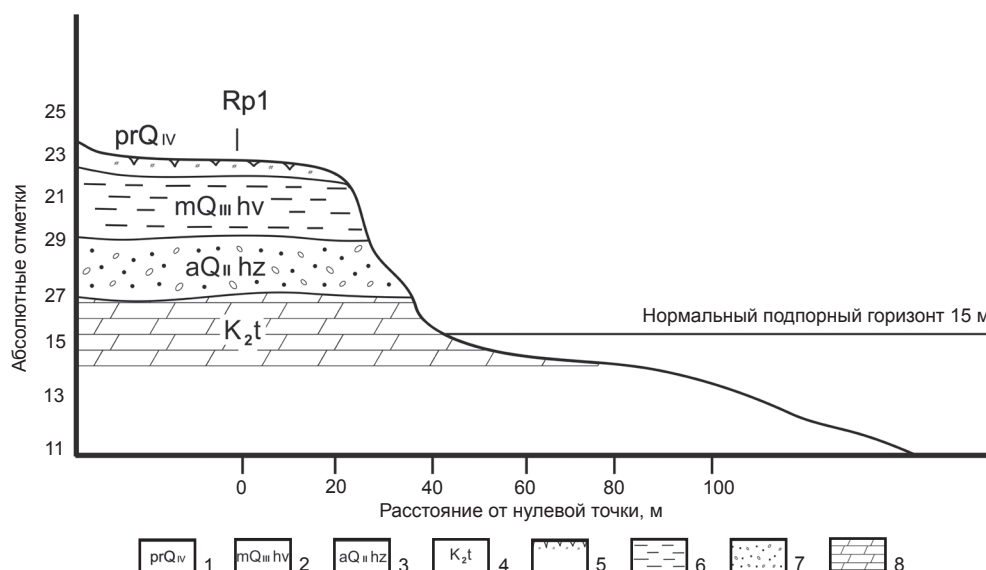


Рис. 4. Поперечный геолого-литологический профиль с. Золотое, которое расположено на правом берегу р. Волги (горизонтальный масштаб: 1:1000, вертикальный масштаб: 1:200):

1–4 – геологические условные обозначения: 1 – покровные отложения отдела четвертичной системы, 2 – морские отложения хвалынского яруса верхнего отдела четвертичной системы, 3 – аллювиальные отложения хазарского яруса среднего отдела четвертичной системы, 4 – туронский ярус верхнего отдела меловой системы; 5–8 – литологические условные обозначения: 5 – почвенно-растительный слой, 6 – глины, 7 – пески с гравием и галькой, 8 – мергели

Fig. 4. Transverse geological and lithological profile of the village of Zolotoye located on the right bank of the Volga River (horizontal scale: 1:1000, vertical scale: 1:200):

1–4 – geological symbols: 1 – cover deposits of the section of the Quaternary system, 2 – marine deposits of the Khvalynsky stage of the upper section of the Quaternary system, 3 – alluvial deposits of the Khazar stage of the middle section of the Quaternary system, 4 – Turonian stage of the upper section of the Cretaceous system; 5–8 – lithological symbols: 5 – soil and vegetation layer, 6 – clays, 7 – sands with gravel and pebbles, 8 – marls

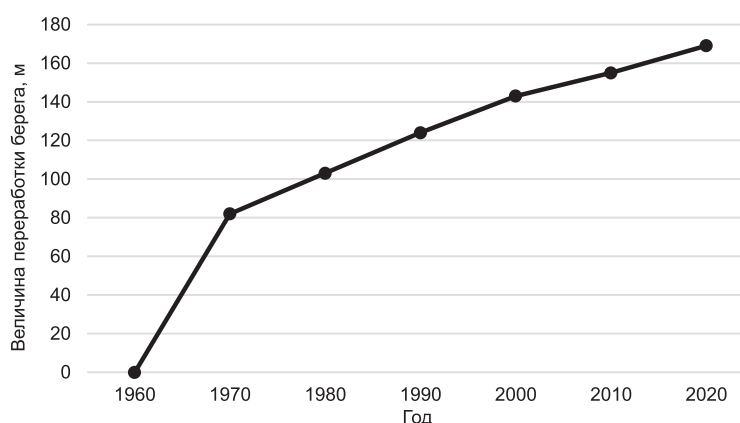


Рис. 5. Обобщенный график изменения величины переработки берега для первой группы пород за весь период существования Волгоградского водохранилища

Fig. 5. Generalized graph of changes in the amount of marginal erosion for the first group of rocks over the entire period of Volgograd reservoir existence

3. На величину переработки берегов, сложенных более прочными породами третьей группы, из исследуемых факторов оказывают влияние ширина отмели, энергия волнения и повторяемость волн высотой более 0,5 м. Так как повторяемость волн высотой более 0,5 м является составной частью энергии волнения, включающей высоту всех волн, то можно счи-

тать, что на величину переработки берегов, сложенных плотными породами, оказывают влияние волны любой высоты. Для третьей группы пород величина переработки берега значительно меньше и в первые 10–20 лет существования водохранилища составляла 4–6 м/год, далее – в среднем 5–8 м за десятилетний период (рис. 7).

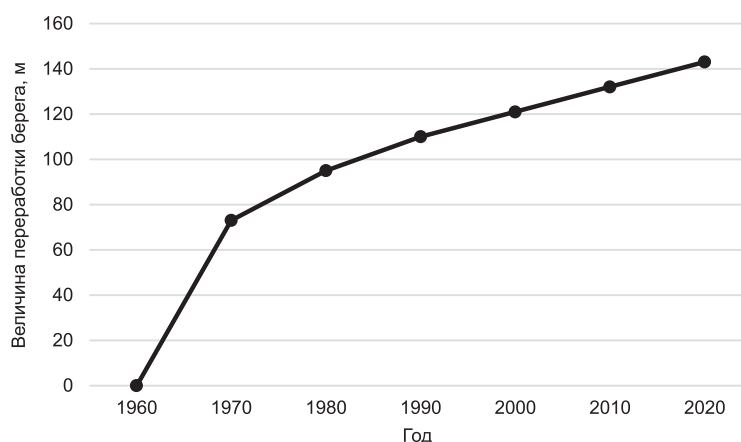


Рис. 6. Обобщенный график изменения величины переработки берега для второй группы пород за весь период существования Волгоградского водохранилища
Fig. 6. Generalized graph of changes in the amount of marginal erosion for the second group of rocks over the entire period of Volgograd reservoir existence

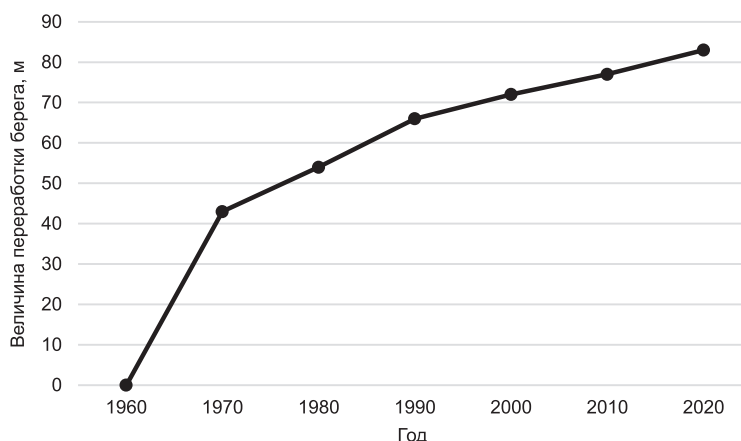


Рис. 7. Обобщенный график изменения величины переработки берега для третьей группы пород за весь период существования Волгоградского водохранилища
Fig. 7. Generalized graph of changes in the amount of marginal erosion for the third group of rocks over the entire period of Volgograd reservoir existence

Выявленные закономерности позволяют оптимизировать проведение мониторинговых наблюдений на существующих длительное время равнинных водохранилищах и лягут в основу выбора прогнозирования изучаемого процесса.

Заключение

Проведенное исследование показало, что при изучении процесса переработки берегов водохранилищ равнинного типа необходимо использовать системный подход. На данный процесс влияет огромное количество факторов: регионально-геологические, зонально-климатические и техногенные. Выявленные закономерности развития процесса переработки берега для отдельных участков Волгоградского водохранилища отражают полифакторность процесса. Подтверждено, что

интенсивность процесса переработки берегов Волгоградского водохранилища зависит от следующих факторов-условий: геолого-литологического строения берега, высоты берегового склона (клифа), ширины надводной и подводной части отмели. Также интенсивность процесса переработки берегов зависит от факторов-процессов: волноэнергетического режима, колебания уровня воды, судового волнения и др. Причем колебание уровня воды является ведущим фактором, влияющим на процесс переработки берегов.

В последующих исследованиях будет разработан алгоритм мониторинговых наблюдений за процессом переработки берегов равнинных водохранилищ, существующих более шестидесяти лет. Полученные данные необходимы для дальнейшего моделирования и прогнозирования процесса переработки берегов.



Список источников

1. Экзарьян В.Н. Перманентное моделирование и прогнозирование экзогенных геологических процессов // Проблемы инженерной геодинамики и экологической геодинамики: материалы Междунар. конф. (г. Москва, 2–3 февраля 2006 г.). М.: Изд-во МГУ, 2006. С. 34–36.
2. Рукавицын В.В., Экзарьян В.Н. Особенности мониторинга геологической среды как обеспечивающей подсистемы национального мониторинга РФ // Разведка и охрана недр. 2023. № 5. С. 55–60. https://doi.org/0.53085/0034-026X_2023_05_55. EDN: IGUSUG.
3. Королев М.В. Мониторинг процесса переработки берегов Угличского водохранилища // Обеспечение качества, безопасности и экономичности строительства. Практика. Проблемы. Перспективы. Инновации: материалы Второй совместной науч.-практ. конф. ГБУ «ЦЭИИС» и ИПРИМ РАН (г. Москва, 12–13 декабря 2019 г.). М.: Изд-во ИПРИМ РАН, 2020. С. 64–77. EDN: KGLNIX.
4. Лагута А.А., Погорелов А.В. Исследование динамики берегов Краснодарского водохранилища методом лидарной съемки // Современные проблемы геологии, геофизики и геоэкологии Северного Кавказа: материалы XIII Всеросс. науч.-техн. конф. с междунар. участием (г. Владикавказ, 4–8 октября 2023 г.). М.: Изд-во ИИЕТ РАН, 2023. С. 539–546. <https://doi.org/10.26200/GSTOU.2023.93.99.071>. EDN: EORFLY.
5. Смирнов А.И. Типы и переработка (переформирование) берегов Нугушского водохранилища на южном Урале (Республика Башкортостан) // Современные проблемы водохранилищ и их водосборов: труды VIII Всеросс. науч.-практ. конф. с междунар. участием (г. Пермь, 27–30 мая 2021 г.). Пермь: Изд-во ПГНИУ, 2021. С. 175–180. EDN: YRBSOT.
6. Ткачев А.А., Цыганок О.Р., Хумарашвили Л.Э., Ключенко К.И. Исследование основных причин переработки берегов водохранилищ // Мелиорация как драйвер модернизации АПК в условиях изменения климата: материалы V Междунар. науч.-практ. интернет-конф. (г. Новочеркасск, 22–24 апреля 2024 г.). Новочеркасск: Лик, 2024. С. 168–177. EDN: AGRXWR.
7. Хафизов А.Р., Хазипова А.Ф., Камалетдинова Л.А., Гайсин И.З., Камалетдинов Ф.Ф. Современные процессы переработки берегов Павловского водохранилища на реке Уфе // Водоочистка. Водоподготовка. Водоснабжение. 2020. № 6. С. 70–73. EDN: KTGUZC.
8. Саваренский Ф.П. К вопросу о переработке береговых склонов реки при ее подпоре // Гидрогеология и инженерная геология. 1936. № 1. С. 3–12.
9. Степанова М.В. Особенности переформирования берегов Волгоградского водохранилища // Геоэкологические проблемы техногенного этапа истории земли – 2023: материалы Междунар. науч.-практ. конф. (г. Москва, 12–13 октября 2023 г.). М.: Изд-во НИУ МГСУ, 2023. С. 131–133. EDN: TEXFYC.
10. Степанова М.В., Экзарьян В.Н. Особенности изучения процесса переформирования берегов крупных водохранилищ с применением материалов дистанционного зондирования // Известия высших учебных заведений. Геология и разведка. 2024. Т. 66. № 2. С. 60–68. <https://doi.org/10.32454/0016-7762-2024-66-2-60-68>. EDN: KHNTYH.
11. Левкевич В.Е. Оценка влияния берегоформирующих факторов на динамику процесса абразии берегов водохранилищ // Мелиорация. 2018. № 1. С. 37–43. EDN: YAMFVB.
12. Епишин В.К., Экзарьян В.Н. Прогноз процесса формирования берегов водохранилищ. М.: Энергия, 1979. 113 с.
13. Михайлова А.В., Экзарьян В.Н. Математическое моделирование процессов формирования берегов водохранилищ // Новые идеи в науках о Земле: сборник трудов IV Междунар. конф. М., 1999. С. 48–54.
14. Емельянова Е.П. Основные закономерности оползневых процессов. М.: Недра, 1972. 308 с.
15. Золотарев Г.С. Инженерно-геологическое изучение береговых склонов и значение истории их формирования для оценки устойчивости // Труды Лаборатории гидрогеологических проблем имени Ф.П. Саварского Академии наук СССР. М.: Изд-во Академии наук СССР, 1961. Т. 35.
16. Кондратьев Н.Е. Расчеты ветрового волнения и переформирование берегов водохранилищ. Л.: Гидрометеиздат, 1953. 110 с.
17. Степанова М.В., Экзарьян В.Н. Инженерно-геологическое районирование прибрежных территорий Волгоградского водохранилища // Молодые – наукам о Земле: материалы XI Междунар. науч. конф. (г. Москва, 03–04 апреля 2024 г.). М.: Изд-во МГРИ, 2024. Т. 4. С. 93–96. EDN: PSZMUM.
18. Качугин Е.Г. Геологическое изучение динамики берегов водохранилищ. М.: Наука, 1975. 145 с.
19. Степанова М.В., Экзарьян В.Н. Методы изучения процесса переформирования берегов водохранилищ // LXXVII Герценовские чтения. География: развитие науки и образования: материалы Междунар. науч.-практ. конф. (г. Санкт-Петербург, 22–26 апреля 2024 г.). СПб.: Изд-во РГПУ им. А.И. Герцена, 2024. С. 175–177. EDN: QPXEBQ.
20. Коломенский Н.В., Оникиенко Т.С., Савченко В.И. [и др.]. Макет карты прогноза переработки берегов существующих водохранилищ // Известия высших учебных заведений. Геология и разведка. 1974. № 2. С. 112–117.

References

1. Ekzaryan V.N. Permanent modeling and forecasting of exogenous geological processes. In: *Problemy inzhenernoi geodinamiki i ekologicheskoi geodinamiki: materialy Mezhdunar. konf. = Problems of engineering geodynamics and environmental geodynamics: Proceedings of the International conference*. 2–3 February 2006, Moscow. Moscow: Lomonosov Moscow State University; 2006, p. 34–36. (In Russ.).
2. Rukavitsyn V.V., Exaran V.N. Features of monitoring of the geological environment as a supporting subsystem of the national monitoring of the Russian Federation. *Prospect and protection of mineral resources*. 2023;5:55–60. (In Russ.). https://doi.org/10.53085/0034-026X_2023_05_55. EDN: IGUSUG.



3. Korolev M.V. Monitoring marginal erosion of the Uglich reservoir shores. In: *Obespechenie kachestva, bezopasnosti i ekonomichnosti stroitel'stva. Praktika. Problemy. Perspektivy. Innovatsii: materialy Vtoroi sovместnoi nauch.-prakt. konf. GBU "TsEIS" i IPRIM RAN = Ensuring construction quality, safety and cost-effectiveness. Practice. Problems. Prospects. Innovations: Proceedings of the 2nd Joint Scientific and Practical Conference of the State Budgetary Institution "Center for Expertise, Research, and Testing in Construction" and Institute of Applied Mechanics of Russian Academy of Sciences.* 12–13 December 2019, Moscow. Moscow: Institute of Applied Mechanics of Russian Academy of Sciences; 2020, p. 64–77. (In Russ.). EDN: KGLHIX.
4. Laguta A.A., Pogorelov A.V. Studying Krasnodar reservoir shore dynamics using the lidar survey method. In: *Sovremennye problemy geologii, geofiziki i geoekologii Severnogo Kavkaza: materialy XIII Vseross. nauch.-tekhn. konf. s mezhdunar. uchastiem = Modern problems of geology, geophysics and geoecology of the North Caucasus: materials of the 13th All-Russian scientific and technical conference with international participation.* 4–8 October 2023, Vladikavkaz. Moscow: S.I. Vavilov Institute for the History of Science and Technology, Russian Academy of Sciences; 2023, p. 539–546. (In Russ.). <https://doi.org/10.26200/GSTOU.2023.93.99.071>. EDN: EORFLY.
5. Smirnov A.I. Types and processing (reforming) of shore Nugush Reservoir in the South Urals (Republic of Bashkortostan). In: *Sovremennye problemy vodokhranilishch i ikh vodosborov: trudy VIII Vseross. nauchn.-prakt. konf. s mezhdunar. uchastiem = Modern problems of reservoirs and their drainage areas: Proceedings of the 8th All-Russian scientific and practical conference with international participation.* 27–30 May 2021, Perm. Perm: Perm State University; 2021, p. 175–180. (In Russ.). EDN: YRBSOT.
6. Tkachev A.A., Tsyganok O.R., Khumarashvili L.E., Klyuchenko K.I. Research of the main reasons for recycling the shore of reservoirs. In: *Melioratsiya kak driver modernizatsii APK v usloviyakh izmeneniya klimata: materialy V Mezhdunar. nauch.-prakt. internet-konf. = Land reclamation as a driver of agro-industrial complex modernization under climate change: proceedings of the 5th International scientific and practical Internet conference.* 22–24 April 2024, Novocherkassk. Novocherkassk: Lik; 2024, p. 168–177. (In Russ.). EDN: AGRXWR.
7. Khafizov A.R., Khazipova A.F., Kamaletdinova L.A., Gaysin I.Z., Kamaletdinov F.F. Modern processes for reworking the banks of the Pavlovsky reservoir on the Ufa river. *Vodoochistka. Vodopodgotovka. Vodosnabzhenie.* 2020;6:70–73. (In Russ.). EDN: KTGUZC.
8. Savarenskii F.P. On the issue of marginal erosion of river banks during backwater. *Hydrogeology and engineering geology.* 1936;1:3–12. (In Russ.).
9. Stepanova M.V. Features of Volgograd reservoir shore reformation. In: *Geoekologicheskie problemy tekhnogenno etapa istorii zemli – 2023: materialy Mezhdunar. nauch.-prakt. konf. = Geoecological problems of the technogenic stage of the Earth's history – 2023: proceedings of the International scientific and practical conference.* 12–13 October 2023, Moscow. Moscow: Moscow State University of Civil Engineering; 2023, p. 131–133. (In Russ.). EDN: TEXFYC.
10. Stepanova M.V., Ekzaryan V.N. Study into the reshaping process of large reservoir banks using remote sensing. *Proceedings of higher educational establishments. Geology and Exploration.* 2024;66(2):60–68. (In Russ.). <https://doi.org/10.32454/0016-7762-2024-66-2-60-68>. EDN: KHNTYH.
11. Levkevich V.E. Assessing the influence of shore-forming factors on reservoir shore erosion dynamics. *Land reclamation.* 2018;1:37–43. (In Russ.). EDN: YAMFVB.
12. Epishin V.K., Ekzar'yan V.N. *Forecast of the reservoir shore formation process.* Moscow: Energiya; 1979, 113 p. (In Russ.).
13. Mikhailova A.V., Ekzar'yan V.N. Mathematical modeling of reservoir shore formation processes. In: *Novye idei v naukakh o Zemle: sbornik trudov IV Mezhdunar. konf. = New ideas in Earth Sciences: proceedings of the 4th International Conference.* Moscow; 1999, p. 48–54. (In Russ.).
14. Emelianova E.P. *Basic patterns of landslide processes.* Moscow: Nedra; 1972, 308 p. (In Russ.).
15. Zolotarev G.S. Engineering and geological study of shore slopes and the significance of their formation history for stability assessment. In: *Proceedings of the F.P. Savarnsky Laboratory of Hydrogeological Problems of the Academy of Sciences of the USSR.* Moscow: Academy of Sciences of the USSR; 1961, vol. 35. (In Russ.).
16. Kondratiev N.E. *Calculations of wind waves and reshaping of reservoir shores.* Leningrad: Gidrometeoizdat; 1953, 110 p. (In Russ.).
17. Stepanova M.V., Ekzarian V.N. Engineering and geological zoning of Volgograd reservoir coastal areas. In: *Molodye – Naukam o Zemle: materialy XI Mezhdunar. nauch. konf. molodykh uchenykh = Young People – to Earth sciences: collected works of the 11th International scientific conference of young scientists.* 3–4 April 2024, Moscow. Moscow: Sergo Ordzhonikidze Russian State University for Geological Prospecting; 2024, vol. 4, p. 93–96. (In Russ.). EDN: PSZMUM.
18. Kachugin E.G. *Geological study of reservoir shore dynamics.* Moscow: Nauka; 1975, 145 p. (In Russ.).
19. Stepanova M.V., Ekzaryan V.N. Methods for studying the process of reforming the banks of reservoirs. In: *LXXVII Gertsenovskie chteniya. Geografiya: razvitie nauki i obrazovaniya: materialy Mezhdunar. nauch.-prakt. konf. = 77th Herzen readings. Geography: development of science and education: proceedings of the International scientific and practical conference.* 22–26 April 2024, St. Petersburg. St. Petersburg: Herzen University; 2024, p. 175–177. (In Russ.). EDN: QPXEBQ.
20. Kolomenskii N.V., Onikienko T.S., Savchenko V.I., et al. Forecast map layout for marginal erosion of existing reservoir shores. *Izvestiya vysshikh uchebnykh zavedenij. Geologiya i razvedka.* 1974;2:112–117. (In Russ.).



Информация об авторах / Information about the authors



Степанова Мария Владимировна,
аспирант,
Российский государственный геологоразведочный университет
имени Серго Орджоникидзе,
г. Москва, Россия,
✉ Stepanova-Mariya2702@yandex.ru
<https://orcid.org/0009-0009-4917-5649>
Maria V. Stepanova,
Postgraduate Student,
Sergo Ordzhonikidze Russian State University for Geological Prospecting,
Moscow, Russia,
✉ Stepanova-Mariya2702@yandex.ru
<https://orcid.org/0009-0009-4917-5649>



Экзарьян Владимир Нишанович,
доктор геолого-минералогических наук, профессор,
заведующий кафедрой экологии и природопользования,
Российский государственный геологоразведочный университет
имени Серго Орджоникидзе,
г. Москва, Россия,
vnekzar@rambler.ru
<https://orcid.org/0009-0003-8521-6715>
Vladimir N. Ekzarian,
Dr. Sci. (Geol.-Mineral.), Professor,
Head of the Ecology and Environmental Management Department,
Sergo Ordzhonikidze Russian State University for Geological Prospecting,
Moscow, Russia,
vnekzar@rambler.ru
<https://orcid.org/0009-0003-8521-6715>

Вклад авторов / Contribution of the authors

М.В. Степанова – курирование данных, формальный анализ, проведение исследования, написание черновика рукописи.

В.Н. Экзарьян – научное руководство, разработка концепции, редактирование рукописи.

Maria V. Stepanova – data curation, formal analysis, investigation, writing – original draft.

Vladimir N. Ekzarian – supervision, conceptualization, writing – editing.

Конфликт интересов / Conflict of interests

Авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов.

The authors declare no conflict of interests.

Все авторы прочитали и одобрили окончательный вариант рукописи.

The final manuscript has been read and approved by all the co-authors.

Информация о статье / Information about the article

Статья поступила в редакцию 28.12.2024; одобрена после рецензирования 10.03.2025; принята к публикации 01.04.2025.

The article was submitted 28.12.2024; approved after reviewing 10.03.2025; accepted for publication 01.04.2025.



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 специальностям:

- 1.6.9. Геофизика (технические науки);
- 1.6.9. Геофизика (геолого-минералогические науки);
- 1.6.10. Геология, поиски и разведка твердых полезных ископаемых, минерагения (геолого-минералогические науки);
- 2.8.1. Технология и техника геолого-разведочных работ (технические науки);
- 2.8.3. Горнопромышленная и нефтегазопромысловая геология, геофизика, маркшейдерское дело и геометрия недр (технические науки);
- 2.8.3. Горнопромышленная и нефтегазопромысловая геология, геофизика, маркшейдерское дело и геометрия недр (геолого-минералогические науки).

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 организациях.

4. Статья сопровождается:

- электронными версиями всех документов (скан), в том числе: авторского заявления, заполненного и подписанного всеми соавторами статьи; авторского договора; сведений обо всех авторах на русском и английском языках с указанием названия места работы, должности и структурного подразделения, наличия ученой степени, ученого звания, почтового и электронного адресов каждого автора статьи, а также номера телефона автора, ответственного за коммуникацию;

акта экспертного заключения о возможности открытой публикации материалов;

- цветными портретными фотографиями авторов на светлом фоне (деловой стиль) в хорошем качестве в формате PNG/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 – Arial, 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. В журнал принимаются статьи трех типов:

Научная статья. Научная статья представляет собой оригинальную исследовательскую рукопись. Такого рода работа должна сообщать о результатах проведения научно обоснованных экспериментов и содержать значительный объем новой информации. Подготовка оригинальной статьи подразумевает использование самых свежих и актуальных источников в данной области. Структура подобной работы включает разделы «Введение», «Материалы и методы исследования», «Результаты исследования», «Обсуждение полученных результатов» и «Заключение». Рекомендуемый минимальный объем научной статьи – 3500 слов.

Обзорная статья. Обзорная статья предполагает проведение всестороннего анализа существующей литературы в области исследования, который выявляет текущие пробелы или проблемы. Такая работа должна быть критической и конструктивной и содержать рекомендации для будущих исследований. В ней не следует представлять никаких новых неопубликованных данных. Структура обзорной статьи может включать введение, другие необходимые разделы, обсуждение полученных результатов, а также заключение с указанием будущих направлений для возможных исследований. Рекомендуемый минимальный объем обзорной статьи – 4000 слов.



Краткое сообщение. Краткое сообщение представляет собой краткую статью, посвященную новому объекту, технологии, методу. Оно также может содержать предварительные результаты исследования либо краткое изложение полного исследования. В кратком сообщении должны быть описаны важные модификации или уникальные применения описанного метода. Краткие сообщения обычно содержат два-три рисунка и/или таблицу; раздел «Материалы и методы исследования» в них должен быть детализирован, чтобы обеспечить воспроизводимость представленной работы, а обзорная часть сокращена. Структура подобной работы аналогична структуре научной статьи и включает такие разделы, как «Введение», «Материалы и методы исследования», «Результаты исследования», «Обсуждение полученных результатов» и «Заключение». Рекомендуемый минимальный объем краткого сообщения – 2500 слов. Допускается последующая публикация расширенного материала, изложенного в кратком сообщении, в нашем либо ином издании с обязательной ссылкой на первую статью.

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, 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 Microsoft Word посредством опции «вставка» – «уравнение».

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.

Все надписи на рисунках должны быть редактируемыми и выполненными 8 кеглем шрифта Arial (основной) на языке текста статьи. В некоторых случаях размер шрифта может быть уменьшен до 5-6 pt. Если на рисунке имеются условные обозначения, они должны быть пронумерованы, а их расшифровку стоит выносить в экспликацию к рисунку. Буквенная нумерация рисунков выполняется 10 кеглем шрифта Arial (полужирный курсив) на английском языке. Помимо представления в тексте статьи рисунки должны быть дополнительно предоставлены отдельными файлами. Векторная графика дополнительно предоставляется в форматах CDR, AI с возможностью редактирования, при экспорте из других программ следует использовать формат PostScript (EPS) с разрешением 300 dpi. Фотографии, сканированные материалы представляются в формате TIFF



или PNG/JPEG (сохранение в формате PNG/JPEG необходимо производить в максимально высоком качестве). Разрешение растровой графики должно составлять не менее 600 dpi для черно-белых рисунков и не менее 300 dpi для фотографий. Схемы, графики, диаграммы предоставляются с расширением .xls (MS Excel).

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, при этом минимум 50 % списка рекомендуется занимать материалами, вышедшими в течение последних 5 лет, в том числе не менее 5 источников должны составлять статьи из иностранных журналов. Самоцитирование автора не должно превышать 25 % от общего количества источников, самоцитирование журнала рекомендуется свести до минимума.

В списке литературы допускаются ссылки на статьи из научных журналов, из сборников материалов научных конференций, из неперiodических сборников научных статей, на книги, посвященные научным исследованиям, а также авторские патенты. Редакционная коллегия рекомендует в списке литературы ссылаться на статьи из журналов, входящих в ядро РИНЦ (Russian Science Citation Index, Web of Science Core Collection, Scopus).

Не допускаются ссылки на нормативные правовые акты (законы, кодексы, указы, положения и пр.), учебные издания (учебники, учебные пособия, конспекты лекций, методические указания и т. д.), справочные издания (справочники, словари и энциклопедии), диссертации и авторефераты, геологические карты, а также страницы электронных ресурсов, не имеющие конкретного авторства. При необходимости обращения к этим источникам ссылку на них следует размещать в подстрочной сноске.

14. Список литературы составляется в двух вариантах. Первый вариант (список источников) 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. Для каждого из соавторов в конце статьи прописывается индивидуальный вклад, который выбирается из следующего списка: разработка концепции; разработка методологии; курирование данных; формальный анализ; получение финансирования; проведение исследования; административное руководство исследовательским проектом; предоставление ресурсов; разработка программного обеспечения; научное руководство; валидация результатов; визуализация; написание черновика рукописи; редактирование рукописи.

16. При подаче статьи авторами предоставляются на английском языке следующие элементы работы: название статьи, сведения об авторах, аннотация, ключевые слова, благодарности, названия таблиц и подписанные подписи, библиография, конфликт интересов.

17. Авторы статей должны придерживаться обязанностей, предусмотренных «Редакционной политикой журнала».

18. Редакция оставляет за собой право отклонять статьи, не отвечающие указанным требованиям. Поступающие в редакцию материалы возврату не подлежат.

19. Редакция оставляет за собой право на научное и литературное редактирование статей с последующим согласованием с авторами.

20. Представленные статьи проходят проверку на наличие заимствований.

21. 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. Академика Курчатова, 3, каб. 207 (институт «Сибирская школа геонаук», Иркутский национальный исследовательский технический университет).

Главный редактор Александр Вадимович Паршин, тел.: +7 (902) 7666990, e-mail: sarhin@geo.istu.edu.

Заместитель главного редактора Лариса Ивановна Аузина, e-mail: lauzina@mail.ru.

Статьи следует направлять ответственному секретарю Марии Николаевне Долгих через личный кабинет на сайте www.nznj.ru или по электронной почте nzn@istu.edu; тел.: +7 (952) 6214436, адрес: 664074, Россия, г. Иркутск, ул. Лермонтова, 83.



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}НИИПИ «Технологии обогащения минерального сырья», Иркутск, Россия

^bИркутский национальный исследовательский технический университет, 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-серицитовых формаций. 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

Финансирование:

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 Tominskoye 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 represented 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

Funding:

Acknowledgements:

Далее идут **текст статьи** (в виде: введение, цель исследования, материалы и методы исследования, результаты исследования и их обсуждение, заключение), **список источников** (references), **вклад авторов** (contribution of the authors) и **конфликт интересов** (conflict of interests).

Информация об авторах / Information about the authors

Портретное
фото автора
(4×4 см)

Курчевская Елена Михайловна,
старший научный сотрудник,
НИИПИ «Технологии обогащения минерального сырья»,
г. Иркутск, Россия,
kurchevskaya@tomsgroup.ru
ORCID

Elena M. Kurchevskaya,
Senior Researcher,
Scientific Research and Design Institute “Technologies of Minerals Separation”,
Irkutsk, Russia,
kurchevskaya@tomsgroup.ru
ORCID

Портретное
фото автора
(4×4 см)

Яхно Марина Владиславовна,
старший преподаватель кафедры геологии и геохимии полезных ископаемых,
Иркутский национальный исследовательский технический университет,
г. Иркутск, Россия,
✉ ymar@istu.edu
ORCID

Marina V. Yakhno,
Senior Lecturer of the Department of Geology and Geochemistry of Minerals,
Irkutsk National Research Technical University,
Irkutsk, Russia,
✉ ymar@istu.edu
ORCID

Портретное
фото автора
(4×4 см)

Сенченко Аркадий Евгеньевич,
генеральный директор,
НИИПИ «Технологии обогащения минерального сырья»,
г. Иркутск, Россия,
senchenko@tomsgroup.ru
ORCID

Arkady E. Senchenko,
CEO,
Scientific Research and Design Institute “Technologies of Minerals Separation”,
Irkutsk, Russia,
senchenko@tomsgroup.ru
ORCID

НАУКИ О ЗЕМЛЕ И НЕДРОПОЛЬЗОВАНИЕ

12+

Научный журнал

Том 48 № 2 (91) 2025

Дизайнер А.А. Хохряков
Редакторы Ю.А. Балашова, Ю.А. Егорова
Перевод на английский язык В.В. Батицкой
Компьютерная верстка Ю.В. Макаровой

Издание распространяется бесплатно

Выход в свет 27.06.2025 г. Формат 60×90/8.
Бумага офсетная. Печать цифровая. Усл. печ. л. 17,75.
Тираж 500 экз. Зак. 58. Поз. плана 4н

Отпечатано в типографии Издательства
ФГБОУ ВО «Иркутский национальный
исследовательский технический университет»,
адрес типографии: 664074, Россия, г. Иркутск, ул. Лермонтова, 83А

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

