

ВЕСТНИК СЕВЕРО-ВОСТОЧНОГО ФЕДЕРАЛЬНОГО УНИВЕРСИТЕТА
ИМЕНИ М.К. АММОСОВА.
VESTNIK OF NORTH-EASTERN FEDERAL UNIVERSITY.
СЕРИЯ “НАУКИ О ЗЕМЛЕ. EARTH SCIENCES”

Сетевое научное периодическое издание

Издается с 2016 года

Издание выходит 4 раза в год

Учредитель и издатель: Федеральное государственное автономное образовательное учреждение высшего образования «Северо-Восточный федеральный университет имени М.К. Аммосова»

№ 4 (40) 2025

РЕДАКЦИОННАЯ КОЛЛЕГИЯ СЕРИИ

Главный редактор

А.Н. Николаев, д. б. н.

Заместитель главного редактора

Е.Э. Соловьев, к. г. – м. н.

Выпускающий редактор

С.Н. Левина, к.г.н.

Члены редакционной коллегии:

Верчеба А. А., доктор геолого-минералогических наук; Витченко А. Н., доктор географических наук; Данилов Ю. Г. кандидат географических наук; Лопух П. С., доктор географических наук; Мартынов В. Л., доктор географических наук; Михно В. Б., доктор географических наук; Нестеров Ю. А., кандидат географических наук; Никифорова З. С., доктор геолого-минералогических наук; Носонов А. М., доктор географических наук; Округин А. В., доктор геолого-минералогических наук; Полуфунтикова Л. И., кандидат геолого-минералогических наук; Присяжный М. Ю., доктор географических наук; Саввинова А. Н., кандидат географических наук; Семенов Ю. М., доктор географических наук; Скоринцева И. Б., доктор географических наук; Тесленок С. А., кандидат географических наук; Толстов А. В., доктор геолого-минералогических наук; Фридовский В. Ю., доктор геолого-минералогических наук; Часовский В. И., доктор географических наук.

Адрес учредителя и издателя: 677000, г. Якутск, ул. Белинского, 58

Адрес редакции: 677010, г. Якутск, ул. Кулаковского, 46, каб. 307

Тел./факс: +7 (4112) 36-15-18. e-mail: vestnik_geo@mail.ru. <https://vfuzeml.elpub.ru/jour/index>

Северо-Восточный федеральный университет

<http://s-vfu.ru/universitet/rukovodstvo-i-struktura/strukturnye-podrazdeleniya/unir/vestnik-svfu/>

VESTNIK OF NORTH-EASTERN FEDERAL UNIVERSITY.
«EARTH SCIENCES»

Network scientific periodical

Published since 2016

The frequency of publication is 4 times a year

The founder and publisher is Federal State Autonomous Educational Institution of Higher Education
“The M. K. Ammosov North-Eastern Federal University”

№ 4 (40) 2025

EDITORIAL BOARD OF THE SERIES

Editor-in-Chief

A. N. Nikovaev, Doctor of Biological Sciences

Deputy Editor-in-Chief

E. E. Solovyov, Candidate of Geological and Mineralogical Sciences

S.N. Levina, Candidate of Geographical Sciences

Members of the Editorial Board of the Series:

A. A. Vercheba, Doctor of Geological and Mineralogical Sciences; Vitchenko A.N, Doctor of Geographical Sciences; Y. G. Danilov, Candidate of Geographical Sciences; Lopuh P. C., Doctor of Geographical Sciences; V. L. Martynov, Doctor of Geographical Sciences; V. B. Mikhno, Doctor of Geographical Sciences; Y. A. Nesterov, Candidate of Geographical Sciences; Z. S. Nikiforova, Doctor of Geological and Mineralogical Sciences; A. M. Nosonov, Doctor of Geographical Sciences; A. V. Okrugin, Doctor of Geological and Mineralogical Sciences; L. I. Polufuntikova, Candidate of Geological and Mineralogical Sciences; M. Y. Prisyazny, Doctor of Geographical Sciences; A. N. Savvinova, Candidate of Geographical Sciences; Y. M. Semenov, Doctor of Geographical Sciences; I.B. Skorintseva, Doctor of Geographical Sciences; S.A. Teslenok, Candidate of Geographical Sciences; A. V. Tolstov. Doctor of Geological and Mineralogical Sciences; V. Y. Fridovsky, Doctor of Geological and Mineralogical Sciences; V. I. Chasovsky, Doctor of Geographical Sciences.

Founder and publisher address: The North-Eastern Federal University, Belinsky str, 58, Yakutsk, 677000.

Editors Office address: The North-Eastern Federal University, Kulakovskogo st, 46, room 307, Yakutsk, 677010

Telephone/Fax: +7 (4112) 36-15-18. e-mail: vestnik_geo@mail.ru. <https://vfuzeml.elpub.ru/jour/index>

<http://s-vfu.ru//universitet/rukovodstvo-i-struktura/strukturnye-podrazdeleniya/unir/vestnik-svfu/>

СОДЕРЖАНИЕ

ГЕОЛОГИЯ, ПОИСКИ И РАЗВЕДКА ТВЕРДЫХ ПОЛЕЗНЫХ ИСКОПАЕМЫХ, МИНЕРАГЕНИЯ

Биллер А. Я., Ощепкова М. Г., Олейников О. Б., Опарин Н. А., Зарукин А. П. Особенности состава минералов группы шпинели из пикритов Анабар-Уджинского междуречья 5

Иванова М. С., Томский К. О. Очистка от парниковых газов отходящих дымовых газов нефтегазового производства Среднеботубинского нефтегазоконденсатного месторождения в среде фторида кальция 17

Калинин А. И., Сивцев А. И. Дифференцированная оценка перспектив нефтегазоносности бортов Вилюйской синеклизы 25

Непеина К.С., Баталева Е.А. Современные средства анализа данных азимутального магнитотеллурического мониторинга на Бишкекском геодинамическом полигоне 44

Третьякова О.Г., Третьяков М.Ф. Тектоно-магматические факторы контроля россыпной и рудной золотоносности Центрально-Алданского района (Южная Якутия) 57

ФИЗИЧЕСКАЯ ГЕОГРАФИЯ И БИОГЕОГРАФИЯ, ГЕОГРАФИЯ ПОЧВ И ГЕОХИМИЯ ЛАНДШАФТОВ

Городничев Р. М., Кондакова Н. С., Левина С. Н., Пестрякова Л. А. Физико-химические особенности воды Атласовских озер г. Якутска 66

Махорин А. В., Агамедова О. В., Бульгинов М. В., Цыденова О. В., Ядрихинский И. В. Мониторинг качества атмосферного воздуха территории Чаяндинского нефтегазоконденсатного месторождения 76

Михайленко А. В., Рубан Д. А. Источники загрязнения воды ртутью в крупных урбанизированных дельтах Африки и Азии 86

CONTENT

GEOLOGY, PROSPECTING AND EXPLORATION OF SOLID MINERALS, MINERALOGY

| | |
|---|----|
| <i>Biller A.Ya., Oshchepkova M.G., Oleinikov O.B., Oparin N.A., Zarukin A.P.</i> Features of composition in spinel subgroup minerals from picrites of the Anabar-Ujinsky interfluve..... | 5 |
| <i>Ivanova M.S., Tomsky K.O.</i> Greenhouse gas treatment from oil and gas production outlet gases at the Srednebotuobinskoye oil and gas condensate field in a calcium fluoride environment..... | 17 |
| <i>Kalinin A.I., Sivtsev A.I.</i> Differentiated assessment of the oil and gas potential of the sides of the Vilyui synecclise..... | 25 |
| <i>Nepeina K.S., Bataleva E.A.</i> Modern tools of analyzing azimuthal magnetotelluric monitoring data at the Bishkek Geodynamic Polygon Test Site | 44 |
| <i>Tretiakova O.G., Tretiakov M.F.</i> Tectono-magmatic controls on placer and lode gold mineralization in the Central Aldan district (Southern Yakutia)..... | 57 |

PHYSICAL GEOGRAPHY AND BIOGEOGRAPHY, SOIL GEOGRAPHY, AND LANDSCAPE GEOCHEMISTRY

| | |
|---|----|
| <i>Gorodnichev R.M., Kondakova N.S., Levina S.N., Pestryakova L.A.</i> Physico-chemical features of the water in the Atlasovskie lakes of Yakutsk | 66 |
| <i>Makhorin A.V., Agamedova O.V., Bultinov M.V., Tsydenova O.V., Yadrikhinsky I.V.</i> Monitoring of atmospheric air quality in the territory of the Chayanda oil and gas condensate field..... | 76 |
| <i>Mikhailenko A.V., Ruban D.A.</i> Sources of water pollution by mercury in large urbanized deltas of Africa and Asia | 86 |

ГЕОЛОГИЯ, ПОИСКИ И РАЗВЕДКА ТВЕРДЫХ ПОЛЕЗНЫХ ИСКОПАЕМЫХ, МИНЕРАГЕНИЯ

УДК 552.3

<https://doi.org/10.25587/2587-8751-2025-1-5-16>

Научная оригинальная статья

ОСОБЕННОСТИ СОСТАВА МИНЕРАЛОВ ГРУППЫ ШПИНЕЛИ ИЗ ПИКРИТОВ АНАБАР-УДЖИНСКОГО МЕЖДУРЕЧЬЯ

А. Я. Биллер¹, М. Г. Ощепкова^{1*}, О. Б. Олейников¹, Н. А. Опарин¹, А. П. Зарукин²

¹Институт геологии алмаза и благородных металлов СО РАН,

г. Якутск, Российская Федерация

²АО «Алмазы Анабара», г. Якутск, Российская Федерация

*oshchepkovamg28@mail.ru

Аннотация

На территории Восточного Прианабарья расположены многочисленные россыпные месторождения алмазов, однако, коренные источники до сих пор не установлены. В то же время в этом регионе широко распространены тела неалмазоносных кимберлитов и близких к ним по составу щелочно-ультраосновных пород пикрит-альнеитового состава, которые также содержат минералы-спутники алмаза. В работе представлено комплексное исследование хромшпинелидов, которые являются типичными минералами малых тел щелочно-ультраосновных пород Томторского поля.

Цель работы – определить типохимические особенности хромшпинелидов щелочно-ультраосновных тел района и оценить их потенциальную роль в формировании минеральных ореолов, связанных с алмазоносными россыпями.

Методами электронно-зондового анализа изучен химический состав хромшпинелидов. Установлено, что они характеризуются широким диапазоном содержаний Cr_2O_3 (23,6–57,4 мас. %), Al_2O_3 (1,5–33,5 мас. %) и MgO (8–18,2 мас. %). Выделена группа зёрен с аномально высокими содержаниями TiO_2 (3,0–7,6 мас. %). На классификационных диаграммах составы образуют тренд от хромита к плеонасту, что типично для пород, кристаллизовавшихся в менее глубинных, по сравнению с кимберлитами, условиях. Наличие зональных зерен, в которых уменьшается содержание хрома от центра к краю, связано с пре-сыщением расплава Al_2O_3 и изменением условий кристаллизации. Установлено сходство состава исследованных хромитов с высоким содержанием TiO_2 с хромшпинелидами из алмазоносных карнийских туфлитов Булкурской антиклинали. Результаты указывают на то, что пикриты могут рассматриваться как один из коренных источников хромшпинелидов в россыпях и промежуточных коллекторах региона.

Ключевые слова: хромшпинелиды, пикриты, щелочно-ультраосновные породы, Томторское поле

Финансирование. Работа выполнена в рамках государственного задания ИГАБМ СО РАН, проект FUFG-2024-0007

Для цитирования: Биллер А. Я., Ощепкова М. Г., Олейников О. Б., Опарин Н. А., Зарукин А. П. Особенности состава минералов группы шпинели из пикритов Анабар-Уджинского междуречья. *Вестник СВФУ*. 2025;(4): 5-16. DOI: 10.25587/2587-8751-2025-1-5-16

FEATURES OF COMPOSITION IN SPINEL SUBGROUP MINERALS FROM PICRITES OF THE ANABAR-UJINSKY INTERFLUVE

Anastasia Ya. Biller¹, Mariya. G. Oshchepkova^{1*}, Oleg B. Oleinikov¹, Nikolay A. Oparin¹, Alexey P. Zarukin²

¹Diamond and Precious Metal Geology Institute SB RAS, Yakutsk, Russian Federation

²JSC “Almazy Anabara”, Yakutsk, Russian Federation

*oshchepkovamg28@mail.ru

Abstract

There are numerous diamond placers on the Eastern Anabar region, but primary sources have not been identified yet. However, non-diamondiferous kimberlite and similar alkaline-ultramafic rocks of picrite-alneite composition, with diamond indicator minerals are widespread in the region. The paper presents a comprehensive study of spinel subgroup minerals, which are typical minerals of small bodies of alkaline-ultramafic rocks of the Tomtor field.

The main goal of the work was to determine the typochemical features of spinel subgroup minerals from alkaline-ultramafic bodies of the region and to evaluate their potential role in the formation of mineral halos associated with alluvial diamond.

It was found that chemical composition of spinel subgroup minerals are characterized by a wide range of Cr_2O_3 (23.6–57.4 wt. %), Al_2O_3 (1.5–33.5 wt. %) and MgO (8–18.2 wt. %) contents. A group of grains with abnormally high TiO_2 contents (3–7.6 wt. %) was identified. In the classification diagrams, the compositions form a trend from chromite to pleonast, typical for rocks crystallized in shallower level than kimberlites. The presence of zoned grains, in which Cr_2O_3 content decreases from the center to the edge, is associated with saturation of the melt with Al_2O_3 and crystallization conditions changing. The similarity of the composition of studied high- TiO_2 Cr-spinels with those from the diamond-bearing Carnian tuffites of the Bulkur anticline was established. The results indicate that picrite bodies can be considered as one of the sources of Cr-spinel in placers and intermediate reservoirs of the region.

Keywords: Cr-spinel, picrite, alkaline-ultramafic rocks, Tomtor field

Funding. The work was carried out within the State Assignment of the DPMGI SB RAS, project FUFG-2024-0007

For citation: Biller A.Ya., Oshchepkova M.G., Oleinikov O.B., Oparin N.A., Zarukin A.P. Features of composition in spinel subgroup minerals from picrites of the Anabar-Ujinsky interfluve. *Vestnik of North-Eastern Federal University. Earth Sciences*. 2025;(4): 5-16. DOI: 10.25587/2587-8751-2025-1-5-16

Введение

Минералы спутники алмаза россыпных месторождений и ореолов имеют важное значение при поиске их коренных источников. Наиболее информативным являются хромшпинелиды, по составу которых можно сделать выводы о формационной природе материала россыпей [1]. При этом необходимо учитывать, что хромшпинелиды присутствуют и в формирующих эксплозивные тела трубчатой формы пикритах, близких по составу и текстурно-структурным признакам к кимберлитам [2]. Химический состав данных минералов является чувствительным индикатором физико-химических условий формирования материнских магм [3, 4]. В связи с этим необходимо установить типохимические особенности индикаторных минералов для некимберлитовых эксплозивных тел, сложенных щелочно-ультраосновными породами.

В работе приводятся результаты петрографического и петрохимического исследования пикритов трубчатых тел и определения типохимических особенностей хромшпинелидов, содержащихся в пикратах и перекрывающих их терригенных отложениях базального горизонта перми. Пикретовые тела были вскрыты буровыми работами при проведении АО «Алмазы Анабара» поисковых работ в Томторском поле щелочно-ультраосновных пород.

Геологическая позиция

Томторское поле малых тел щелочно-ультраосновных пород расположено в восточной части Анабарской антеклизы в пределах Уджинской провинции щелочных пород (рис. 1). По данным А.И. Зайцева и А.П. Смелова, на территории поля известно более 70 тел, в том числе трубочной формы, размером до 10000 м² [5]. По петрографическому составу среди них были выделены кимберлиты, альнеиты, пикритовые порфиры, кимберлитовые, пикритовые и альнеитовые брекчии [2, 5]. Кроме того, в Томторском поле присутствуют базиты рифейского и пермско-триасового возрастов, а также осадочные и вулканогенно-осадочные образования рифея, венда, кембрия и терригенные породы перми и юры. Согласно результатам датирования, Rb-Sr и K-Ag методами, возраст щелочно-ультраосновных образований от 213 до 608 млн лет [2, 5]. По совокупности петрографических и формационных признаков тела Томторского поля отнесены к щелочно-ультраосновным образованиям, по составу и текстурно-структурным особенностям конвергентным кимберлитам.

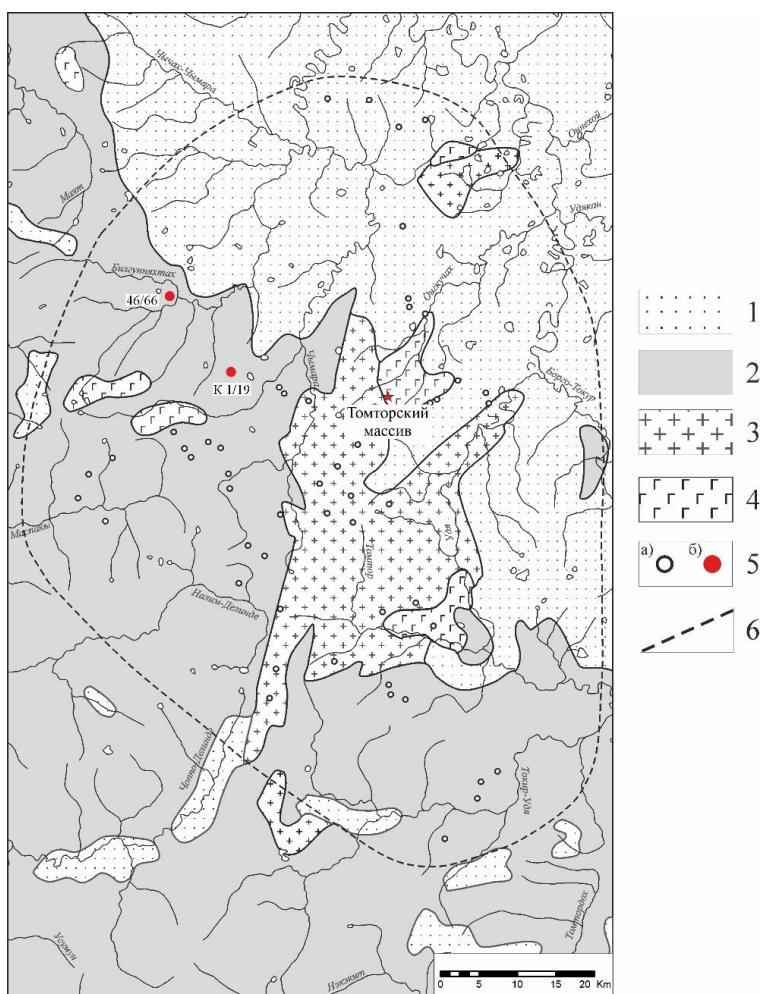


Рис. 1. Схема геологического строения Томторского поля щелочно-ультраосновных пород по [5] с изменениями. 1 – мезозой; 2 – палеозой; 3 – протерозой-архей; 4 – силлы базитов различного возраста; 5 – геофизические аномалии трубочного типа (а), разбуренные аномалии 46/66 и К 1/19-1, рассматриваемые в настоящей работе (б); 6 – предполагаемые границы Томторского поля

Fig. 1. Geological scheme of the Tomtor field of alkaline-ultramafic rocks, according to [5] with changes. 1 – Mesozoic; 2 – Paleozoic; 3 – Proterozoic-Archean; 4 – sills of basites; 5 – pipe-typed geophysical anomalies (a), anomalies 46/66 and K 1/19 in this study (b); 6 – assumed boundaries of the Tomtor field

Материалы и методы исследования

Все аналитические работы проведены в Институте геологии алмаза и благородных металлов СО РАН.

Химический состав хромшпинелидов определен на электронно-зондовом микроанализаторе “Camebax-micro” (Женвилье, Франция), аналитик Н.В. Христофорова. Анализ проводился при ускоряющем напряжении 20 кВ и токе пучка 40 нА, диаметр пучка электронного зонда составлял 1 мкм, время съемки 7 сек. Предел обнаружения анализируемых элементов для Na 0,07 мас. %, для Cr и Mn менее 0,03 мас. % и 0,01 мас. % для Ti и K. Для остальных элементов – <0,05 мас. %.

Микроскопическое изучение петрографических особенностей пород проводилось на поляризационном микроскопе Carl Zeiss Axioscop 40.

Химический состав пикритов определен методом силикатного анализа, включая атомно-эмиссионную спектрометрию, ионометрию с ион-селективным электродом, гравиметрию, титриметрию.

Изучение морфологии и зональности зерен производились методами сканирующей электронной микроскопии в эпоксидных шашках, напыленных проводящим слоем углерода (до синего цвета). Исследования проводились на электронном сканирующем микроскопе Jeol (JSM-6480LV) с энергетическим спектрометром INCA-Energy 350 при напряжении на катоде 20 кВ и токе электронов 1 нА.

Изучен керновый материал, полученный при заверке бурением геофизических аномалий К 1/19 и 46/66. Из керна скважины аномалии К 1/19 отобраны образцы терригенных отложений базального горизонта перми (76,5–76,9 м) и пикритов (123,0–140,0 м). Образцы пикритов аномалии 46/66 получены из глубин 54,0 – 55,0 м и 65,0 – 66,0 м.

Петрография и петрохимия пикритов

Исследование посвящено изучению хромшпинелидов из слюдяных пикритов аномалий К 1/19-1 и 46/66 (рис. 1) и перекрывающих их терригенных отложений базального горизонта перми, вскрытых поисковыми скважинами. По данным бурения мощность перекрывающих пермских и юрских терригенных отложений не более 100 м.

Трубочное тело аномалии 46/66 сложено слюдяным пикритом, имеющим порфировую структуру. Порфироидные вкрапленники размером от 0,1 до 1 см представлены псевдоморфозами серпентина и хлорита по оливину и слюде. Основная масса меняется с глубиной от смектит-карбонатной до серпентин-слюдистой. Структура мезостазиса гипидиоморфнозернистая, местами неравномернозернистая, пойкилитовая: крупные (до 2,5 мм) зерна слюды включают рудные минералы и псевдоморфозы серпентина по оливину (рис. 2). Встречаются редкие зерна хромита и футляровидные кристаллы антазита. Местами присутствуют крупные выделения кальцита. Апатит фиксируется в виде зерен неправильной формы в карбонате.

Породы аномалии К 1/19 представлены в различной степени измененными слюдяными пикритами. Структура породы неравномернозернистая, мелкопорфировая. Порфировые выделения изометричной формы, размером до 0,1–0,3 мм, представлены полными псевдоморфозами по оливину и частично замещенному флогопиту (рис. 3). Межзерновое пространство выполнено тонкозернистой слюдисто-хлоритовой, местами карбонатизированной основной массой. Скрытокристаллический мезостазис часто глинизован. Местами крупные зерна флогопита содержат включения хромита, магнетита, первовскита, апатита и андрадита. Андрадит в основной массе обрастаает чешуйки флогопита и выполняет межзерновое пространство. Апатит образует обособленные игольчатые кристаллы, пойкилитовые включения в слюде и крупные зерна (до 500 мкм) в интерстициях между таблицами флогопита. Карбонаты в незначительном количестве развиты на всех уровнях, представлены кальцитом и анкеритом, встречаются в виде скоплений в основной массе. Отмечаются редкие зерна минералов группы шпинели.

По петрохимическим характеристикам породы изученных аномалий относятся к пикритам, для них характерны средние содержания магния (11,39–17,86 мас. % MgO), невысокие содержания двух и трехвалентного Fe. Высокое содержание калия (до 2,41 мас. % K_2O) связано с количеством флогопита, являющегося основным минералом в этих породах.

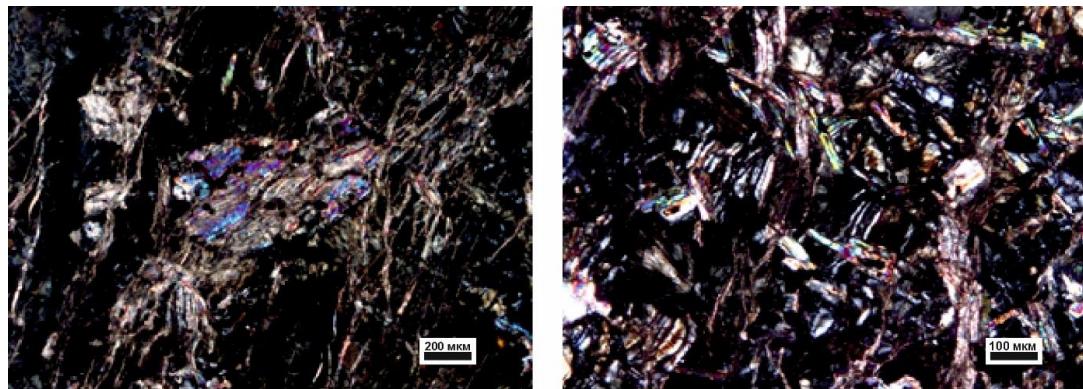


Рис. 2. Аномалия 46/66, слюдяной пикрит: А – порфировые выделения слюды и псевдоморфозы вторичных минералов по оливину, Б – гипидиоморфнозернистая основная масса смектит-серпентинового состава, с измененными призматическими чешуйками флогопита.
Фото шлифа с анализатором

Fig. 2. Anomaly 46/66, micaceous picrite: A – mica porphyritic aggregates and secondary minerals pseudomorphs after olivine; B – subhedral groundmass of smectite-serpentine composition, with altered prismatic phlogopite flakes. Photo of thin section in cross-polarized light

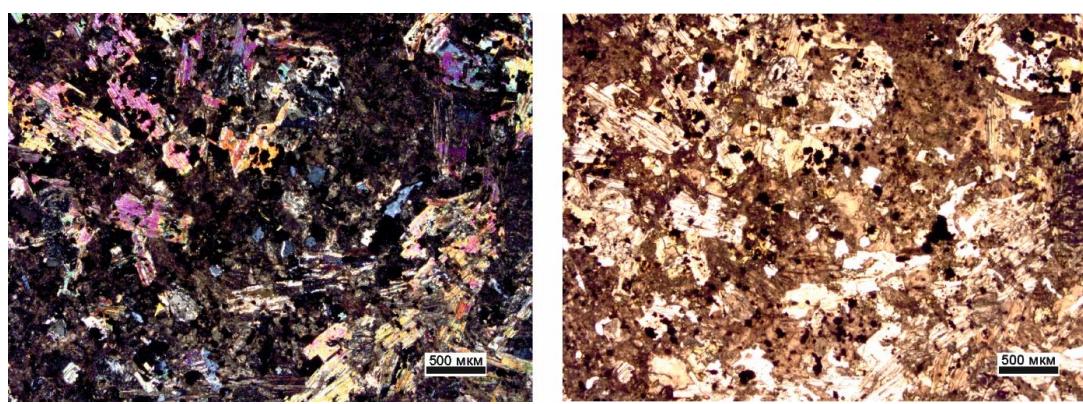


Рис. 3. Аномалия К 1/19, слюдяной пикрит с частично замещенными чешуйками слюды и тонкозернистой слюдисто-хлоритовой основной массой. Фото шлифа:
А – с анализатором, Б – без анализатора

Fig. 3. Anomaly K 1/19, micaceous picrite with partially replaced mica and fine-grained mica-chlorite groundmass. Photo in thin section: A – cross-polarized light, B – plane-polarized light

Особенности состава минералов группы шпинели

Макрокристаллы минералов группы шпинели представлены зернами преимущественно неправильной формы, с резорбированными краями размером до 0,5 мм. Редко присутствуют октаэдры. Большинство зёрен по химическому составу относится к магнезиохромитам по класси-

фикации [6]. В незначительном количестве присутствуют зерна хромита и шпинели. В редких зональных кристаллах от центра к краю наблюдается уменьшение содержания Cr_2O_3 , MgO и увеличение FeO , вплоть до магнетита (рис. 4). Иногда в таких зонах присутствуют включения силикатных минералов: оливина, флогопита и/или клинопироксена. На рисунке 4 представлено зональное зерно магнезиохромита, из пикрита аномалии К 1/19, где центральная серая область – магнезиохромит, краевая темно-серая зона шириной около 50 мкм – магнезиохромит с повышенным содержанием FeO 22,5 мас. % и низким Cr_2O_3 37,9 мас. %, по сравнению с центром – 20,4 мас. %, 51,1 мас. %, соответственно. Тонкая светлая оторочка, мощностью не более 5 мкм – магнетит.

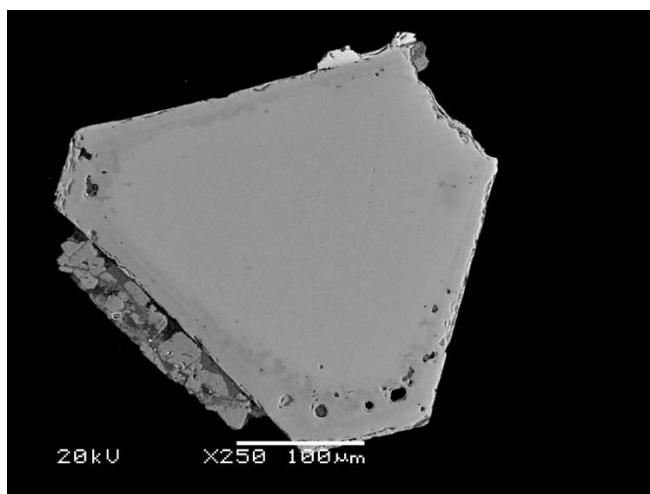


Рис. 4. Зональное зерно магнезиохромита с силикатными включениями из пикрита аномалии К 1/19.
Изображение в обратно рассеянных электронах

Fig. 4. Zoned magnesiochromite grain with silicate inclusions from anomaly K 1/19 picrites. BSE image

Состав хромшпинелидов из пикритов изученных аномалий характеризуется следующими особенностями: Cr_2O_3 варьирует в широких пределах от 23,6 мас. % до 57,4 мас. %; Al_2O_3 – от 1,5 до 33,5 мас. %, демонстрируя обратную корреляцию с Cr_2O_3 . Минимальные содержания Al_2O_3 отмечаются в хромитах из пикритов аномалии К 1/19 и перекрывающих отложений перми. Содержания MgO находятся в интервале 8,00–18,2 мас. %. Большая часть зерен содержит TiO_2 в пределах 0,8–2 мас. %, однако, встречаются зёरна с содержанием TiO_2 3–7,6 мас. % (табл. 1, рис. 5).

На дискриминационных диаграммах выделяется 2 группы хромшпинелидов: первая – наиболее многочисленная, имеет обратную зависимость между содержаниями Cr_2O_3 и Al_2O_3 (рис. 6а) и вторая группа с невысокими содержаниями Al_2O_3 и повышенным TiO_2 . Эта немногочисленная группа зерен на дискриминационной диаграмме $\text{Fe}^{2+}/(\text{Fe}^{2+}+\text{Mg})-\text{Cr}/(\text{Cr}+\text{Al})$ [1] лежит вне поля хромшпинелидов кимберлитов (рис. 6б).

Хромшпинелиды из пикритов и перекрывающих их пермских отложений демонстрируют близкий химический состав. Вероятно, что источником хромшпинелидов в терригенных пермских отложениях являлись пикритовые тела Томторского поля.

Таблица

Table

Представительные анализы химического состава минералов группы шпинели
из никрекитов аномалий К 1/19 и 46/66 и базальных отложений перми

Representative analyses of the chemical composition of spinel subgroup minerals from picrites
of anomalies K 1/19 and 46/66 and Permian basal surface

| | К 1/19 | | | 46/66 | | | Базальный горизонт | | |
|--------------------------------|------------------|------------------|--------------------------------|--------------------------------|--------------------------------|-------|--------------------|-------|-------|
| | SiO ₂ | TiO ₂ | Al ₂ O ₃ | Cr ₂ O ₃ | Fe ₂ O ₃ | FeO | MnO | MgO | Сумма |
| SiO ₂ | 0,04 | 0,00 | 0,00 | 0,09 | 0,01 | 0,04 | 0,18 | 0,11 | 0,00 |
| TiO ₂ | 0,89 | 1,80 | 7,62 | 0,93 | 2,24 | 1,75 | 1,41 | 0,74 | 7,13 |
| Al ₂ O ₃ | 15,89 | 26,86 | 5,02 | 17,79 | 6,24 | 33,54 | 16,91 | 17,94 | 9,05 |
| Cr ₂ O ₃ | 48,40 | 32,27 | 27,81 | 46,81 | 57,42 | 23,58 | 45,60 | 47,16 | 28,81 |
| Fe ₂ O ₃ | 6,44 | 9,62 | 24,68 | 7,37 | 6,79 | 10,56 | 11,37 | 6,84 | 20,25 |
| FeO | 13,28 | 14,99 | 26,72 | 11,67 | 15,05 | 14,74 | 8,85 | 11,43 | 25,32 |
| MnO | 0,19 | 0,21 | 0,47 | 0,18 | 0,26 | 0,17 | 0,17 | 0,19 | 0,37 |
| MgO | 14,13 | 14,89 | 8,01 | 15,71 | 13,08 | 15,62 | 18,24 | 15,69 | 9,10 |
| Сумма | 98,61 | 99,66 | 97,86 | 99,84 | 100,42 | 98,94 | 101,60 | 99,41 | 98,02 |
| Si | 0,00 | 0,00 | 0,00 | 0,00 | 0,00 | 0,00 | 0,01 | 0,00 | 0,00 |
| Ti | 0,02 | 0,04 | 0,20 | 0,02 | 0,06 | 0,04 | 0,03 | 0,02 | 0,18 |
| Al | 0,59 | 0,94 | 0,20 | 0,64 | 0,24 | 1,15 | 0,59 | 0,65 | 0,36 |
| Cr | 1,21 | 0,76 | 0,76 | 1,14 | 1,48 | 0,54 | 1,08 | 1,15 | 0,77 |
| Fe ³⁺ | 0,15 | 0,22 | 0,64 | 0,17 | 0,17 | 0,23 | 0,26 | 0,16 | 0,51 |
| Fe | 0,35 | 0,37 | 0,77 | 0,30 | 0,41 | 0,36 | 0,22 | 0,29 | 0,71 |
| Mn | 0,01 | 0,01 | 0,01 | 0,00 | 0,01 | 0,00 | 0,00 | 0,01 | 0,01 |
| Mg | 0,67 | 0,66 | 0,41 | 0,72 | 0,64 | 0,68 | 0,81 | 0,72 | 0,46 |
| Сумма | 3,00 | 3,00 | 3,00 | 3,00 | 3,00 | 3,00 | 3,00 | 3,00 | 3,00 |
| <i>f</i> | 34,52 | 36,09 | 65,18 | 29,43 | 39,24 | 34,62 | 21,41 | 29,01 | 60,96 |
| Cr# | 67,14 | 44,63 | 78,80 | 63,84 | 86,06 | 32,05 | 64,40 | 63,81 | 68,11 |
| | | | | | | | | | |

Примечание. $f = \text{Fe}^{2+}/(\text{Fe}^{2+} + \text{Mg})$; Cr# = Cr/(Cr+Al).

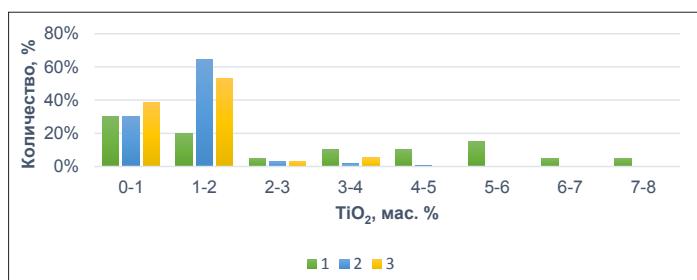


Рис. 5. Гистограмма распределения содержаний TiO_2 в минералах группы шпинели из: 1 – пикритов аномалии К 1/19 ($n = 20$); 2 – 46/66 ($n = 653$); 3 – перекрывающих терригенных отложений базального горизонта перми ($n = 94$), где n – количество зерен

Fig. 5. Histogram of TiO_2 content distribution in spinel subgroup minerals from: 1 – K 1/19 picrites ($n = 20$); 2 – 46/66 picrites ($n = 653$); 3 – overlying terrigenous deposits of Permian basal surface ($n = 94$), n – number of grains

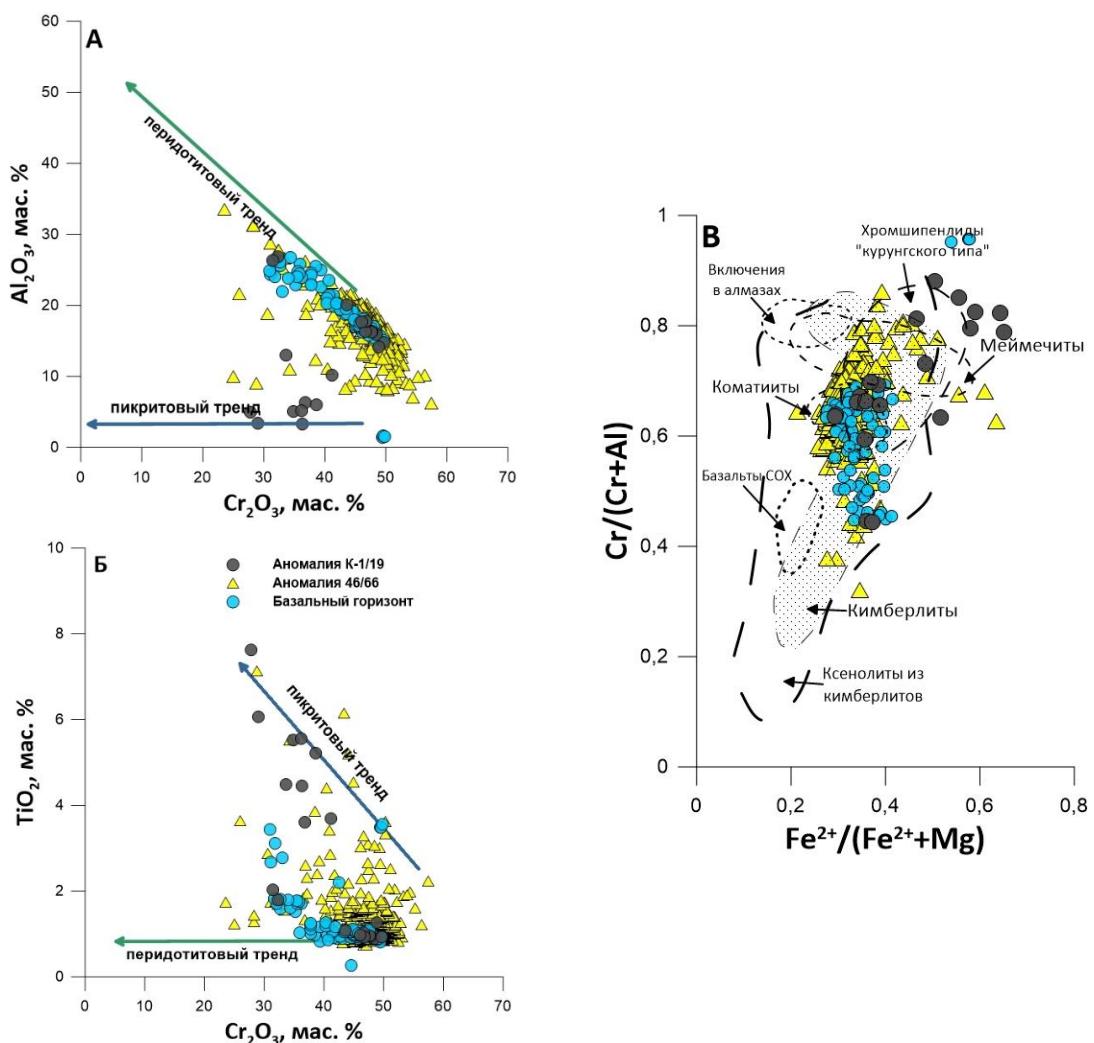


Рис. 6. Классификационные диаграммы составов минералов группы шпинели по: А [3], Б [4], В [1]. Условные обозначения приведены на рисунке Б

Fig. 6. Classification diagrams of spinel subgroup minerals compositions according to: А [3], Б [4], В [1]. Legend is shown on figure B

На диаграмме Fe^{3+} -Al-Cr подавляющее большинство минералов ложатся в тренд 3, от хромита к плеонасту, что, согласно П.Л. Редеру и Д. Шульцу [7], указывает на быструю кристаллизацию в условиях пересыщения Al_2O_3 и уменьшения содержания Cr_2O_3 при относительно стабильных значениях железистости (рис. 7). Этот тренд близок хромитам из базальтов срединно-океанических хребтов. Группа высокотитанистых и низкоглиноземистых шпинелидов из аномалии К 1/19 (табл. 1) располагаются ближе к тренду 2 отдельно от основной массы зерен. Тренд 2 характерен хромитам с повышенным содержанием TiO_2 и высокой железистостью ($\text{Fe}^{2+}/(\text{Fe}^{2+}+\text{Mg})$). Формирование таких минералов связывают с одновременной кристаллизацией богатых Mg и Al силикатных минералов, как оливин, флогопит в кимберлитах, или пироксен и плагиоклаз в базальтах. Зональность, установленная в исследуемых кристаллах, свидетельствует о быстрым изменениях условиях, включая изменение РТ-параметров, фугитивность кислорода и состав среды кристаллизации [7]. Отметим, что изученные шпинелиды не попадают (исключая единичные зерна) в тренд 1 от хромита к магнезиальной ульвошпинели, который характерен для алмазоносных кимберлитов.

Сравнительный анализ выявил близость по составу хромитов из пикритов и карнийских алмазоносных туффитов Булкурской антиклинали [8, 9], которая проявляется в умеренном содержании Cr_2O_3 (до ~50 мас. %) при повышенных концентрациях TiO_2 (3–8 мас. %). Данное соответствие позволяет рассматривать пикриты Томторского поля в качестве одного из вероятных коренных источников хромитов в алмазоносных россыпях и промежуточных коллекторах.

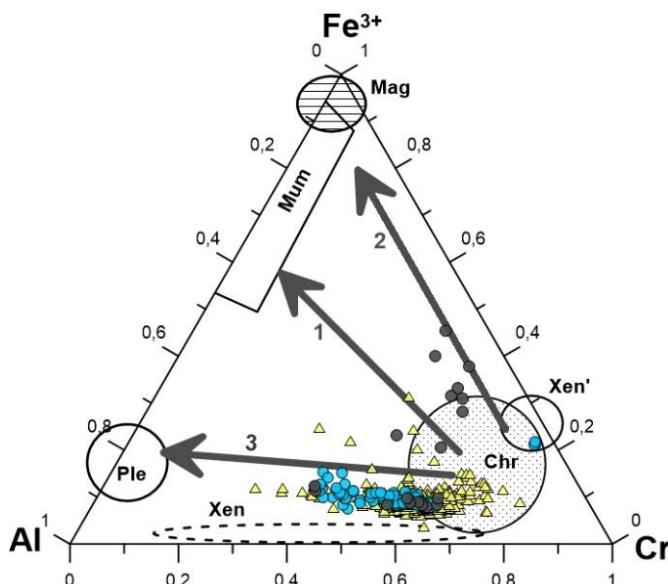


Рис. 7. Положение фигуративных точек составов минералов группы шпинели из пикритов и отложений базального горизонта перми на диаграмме Fe^{3+} -Al-Cr. Выделенные поля: Chr – хромит, Mag – магнетит, Mum – магнезио-ульвошпинель-магнетит, Ple – плеонаст, Xen – шпинелидов из ксенолитов перидотитов, Xen' – шпинелидов из метасоматизированных ксенолитов перидотитов. Тренды: 1 – кимберлитовый, 2 – Fe-Ti, 3 – Cr-Al по [7]. Условные обозначения приведены на рисунке 6Б

Fig. 7. Position of spinel subgroup minerals compositions from picrites and Permian basal surface on Fe^{3+} -Al-Cr diagram. The fields: Chr – chromite, Mag – magnetite, Mum – magnesio- ulvöspinel-magnetite, Ple – pleonaste, Xen – spinel from peridotite xenoliths, Xen' – spinel from metasomatized peridotite xenoliths. Trends: kimberlite (1); Fe-Ti (2); Cr-Al (3) [7]. Legend is shown on figure 6Б

Заключение

В исследованных образцах пикритов Томторского поля содержание Cr_2O_3 в минералах группы шпинели варьирует в диапазоне 23,5–57,4 мас. %, а хромистость $\text{Cr}\# = \text{Cr}/(\text{Cr}+\text{Al})$ не превышает 0,7, при этом в большинстве зерен $<0,6$. Такие характеристики типичны для минералов менее глубинных мантийных обстановок, по сравнению с хромшпинелидами алмазоносных ассоциаций, обладающих исключительно высокими содержаниями Cr_2O_3 (обычно >62 мас. %) [3, 10, 11].

Низкое содержание TiO_2 ($<0,5$ –0,7 мас. %) является одним из маркеров хромшпинелидов алмазного парагенезиса [3, 11]. В изученных хромитах отмечается более широкое распределение TiO_2 с формированием отдельной группы зерен с аномально высокими содержаниями (3–7,6 мас. %), что может свидетельствовать о значительной роли метасоматоза при их образовании.

Значительное разнообразие составов минералов группы шпинели в исследуемых породах свидетельствует о сложной истории их формирования. Группа хромитов с высокими содержаниями Cr_2O_3 и MgO указывает на формирование из наиболее глубинных мантийных источников, а увеличение содержания Al_2O_3 свидетельствует о следующей более поздней генерации, которая связана с эволюцией расплава, обеспечившей рост концентрации Al_2O_3 и истощении Cr_2O_3 .

Схожесть составов части зерен хромшпинелидов из пикритовых тел и карнийских туффитов позволяет рассматривать пикриты как вероятный коренной источник для части терригенного материала в верхнетриасовых осадочных коллекторах региона.

Литература

1. Афанасьев В.П., Зинчук Н.Н., Похilenko Н.П. *Морфология и морфогенез индикаторных минералов кимберлитов*. Новосибирск: Филиал «Гео» Издательства СО РАН, Издательский дом «Манускрипт»; 2001:276.
2. Лапин А.В., Толстов А.В., Лисицын Д.В. *Кимберлиты и конвергентные породы*. Москва: ИМГРЭ; 2004:226.
3. Соболев Н.В., Похilenko Н.П., Лаврентьев Ю.Г., Усова Л.В. Особенности состава хромшпинелидов из алмазов и кимберлитов Якутии. *Геология и геофизика*. 1975;11:7-24.
4. Kamenetsky V.S., Crawford A.J., Meffre S. Factors controlling chemistry of magmatic spinel: an empirical study of associated olivine, Cr-spinel and melt inclusions from primitive rocks. *Journal of Petrology*. 2001;42:655-671.
5. Зайцев А.И., Смелов А.П. *Изотопная геохронология пород кимберлитовой формации Якутской провинции*. Якутск: Офсет; 2010:107.
6. Bosi F., Biagioni C., Pasero M. Nomenclature and classification of the spinel supergroup. *European Journal of Mineralogy*. 2019; 31(1):183-192.
7. Roeder P.L., Schulze D.J. Crystallization of groundmass spinel in kimberlite. *Journal of Petrology*. 2008; 49(8):1473-1495. DOI: 10.1093/petrology/egn034
8. Николенко Е.И., Логвинова А.М., Изох А.Э., и др. Ассоциация хромшпинелидов из верхнетриасовых гравелитов северо-востока Сибирской платформы. *Геология и геофизика*. 2018;59(10):1680-1700. DOI: 10.1016/j.rgg.2018.09.011
9. Биллер А.Я., Угальева С.С., Олейников О.Б. Хромшпинелиды алмазоносных туффитов Булкурской антиклинали (северо-восток Сибирской платформы). *Наука и образование*. 2017;4(88):44-49.
10. Barnes S.J., Roeder P.L. The range of spinel compositions in terrestrial mafic and ultramafic rocks. *Journal of Petrology*. 2001;42 (12):2279-2302.
11. Griffin W.L., Ryan C.G., Gurney J.J., Sobolev N.V., Win T.T. Chromite macrocrysts in kimberlites and lamproites: geochemistry and origin. *Proceedings of the Fifth International Kimberlite Conference: Extended Abstracts*, 1991:142–144.

References

1. Afanasyev V.P., Zinchuk N.N., Pokhilenko N.P. *Morphology and morphogenesis of indicator minerals of kimberlites*. Novosibirsk: Geo Branch of the Siberian Branch of the Russian Academy of Sciences, Manuscript Publishing House; 2001:276 (in Russian).
2. Lapin A.V., Tolstov A.V., Lisitsyn D.V. *Kimberlites and convergent rocks*. Moscow: IMGRE; 2004:226 (in Russian).
3. Sobolev N.V., Pokhilenko N.P., Lavrentiev Yu.G., Usova L.V. Features of the composition of chrome spinels from diamonds and kimberlites of Yakutia. *Geology and geophysics*. 1975;11:7–24 (in Russian).
4. Kamenetsky V.S., Crawford A.J., Meffre S. Factors controlling chemistry of magmatic spinel: an empirical study of associated olivine, Cr-spinel and melt inclusions from primitive rocks. *Journal of Petrology*. 2001;42:655–671.
5. Zaitsev A.I., Smelov A.P. *Isotopic geochronology of kimberlite formation rocks of the Yakut province*. Yakutsk: Ofset; 2010:107 (in Russian).
6. Bosi F., Biagioni C., Pasero M. Nomenclature and classification of the spinel supergroup. *European Journal of Mineralogy*. 2019;31(1):183–192.
7. Roeder P.L., Schulze D.J. Crystallization of groundmass spinel in kimberlite. *Journal of Petrology*. 2008;49(8):1473–1495. DOI: 10.1093/petrology/egn034
8. Nikolenko E.I., Logvinova A.M., Izokh A.E., et al. Cr-spinel assemblage from the Upper Triassic gritstones of the northeastern Siberian Platform. *Russian Geology and Geophysics*. 2018;59(10):1680–1700 (in Russian). DOI: 10.1016/j.rgg.2018.09.011
9. Biller A.Ya., Ugapieva S.S., Oleynikov O.B. Chromium spinels of diamond-bearing tuffites of the Bulkur anticline (northeast of the Siberian platform). *Science and Education*. 2017;4(88):44–49 (in Russian).
10. Barnes S.J., Roeder P.L. The range of spinel compositions in terrestrial mafic and ultramafic rocks. *Journal of Petrology*. 2001;42(12):2279–2302.
11. Griffin W.L., Ryan C.G., Gurney J.J., Sobolev N.V., Win T.T. Chromite macrocrysts in kimberlites and lamproites; geochemistry and origin. *Proceedings of the Fifth International Kimberlite Conference: Extended Abstracts*, 1991:142–144.

Сведения об авторах

БИЛЛЕР Анастасия Яковлевна – вед. инженер Института геологии алмазов и благородных металлов СО РАН, Scopus ID: 56416244600, ORCID 0000-0002-1628-2984 SPIN-код: 5756-2232

ОЩЕПКОВА Мария Геннадиевна – м.н.с. Института геологии алмазов и благородных металлов СО РАН, Scopus ID: 58627916500, ORCID 0000-0002-2777-0449, SPIN-код: 2649-5300

е-mail: oshchepkovamg28@mail.ru

ОЛЕЙНИКОВ Олег Борисович – к.г.-м.н., в.н.с., Института геологии алмазов и благородных металлов СО РАН, ORCID 0000-0003-1010-7592

ОПАРИН Николай Александрович – м.н.с. Института геологии алмазов и благородных металлов СО РАН, Scopus ID: 57035370200, ORCID 0000-0002-3019-1245, SPIN-код: 9572-9398

ЗАРУКИН Алексей Павлович – нач. отряда, АО «Алмазы Анабара»

About the authors

Anastasia Ya. BILLER – Lead Engineer, Diamond and Precious Metal Geology Institute SB RAS, Yakutsk, Russian Federation, Scopus ID: 56416244600, ORCID 0000-0002-1628-2984 SPIN-code: 5756-2232

Mariya G. OSHCHEPKOVA – Junior Researcher, Diamond and Precious Metal Geology Institute SB RAS, Yakutsk, Russian Federation, Scopus ID: 58627916500, ORCID 0000-0002-2777-0449, SPIN-code: 2649-5300
е-mail: oshchepkovamg28@mail.ru

Oleg B. OLEYNIKOV – Cand. Sci. (Geology and Mineralogy), Lead Researcher, Diamond and Precious Metal Geology Institute SB RAS, Yakutsk, Russian Federation, ORCID 0000-0003-1010-7592

Nikolay A. OPARIN – Junior Researcher, Diamond and Precious Metal Geology Institute SB RAS, Yakutsk, Russian Federation, Scopus ID: 57035370200, ORCID 0000-0002-3019-1245, SPIN-код: 9572-9398

Alexey P. ZARUKIN – head of a party, JSC “Almazy Anabara”, Yakutsk, Russian Federation

Конфликт интересов

Авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов. Корреспондент имеет право и полномочия выступать от имени всех авторов по этому исследованию.

Conflict of interests

The authors declare no conflict of interest. The corresponding author has the right and authority to speak on behalf of all authors in this study

Вклад авторов

Биллер А.Я. – концепция исследования, проведение исследований, обработка материала, литературный обзор, выводы

Ощепкова М.Г. – проведение исследований, обработка материала, графическое оформление

Олейников О.Б. – концепция исследования, выводы

Опарин Н.А. – сбор данных, статистическая обработка

Зарукин А.П. – сбор данных

Authors contribution

Anastasia Ya. Biller – research concept, research implementation, data processing, literature review, conclusions

Mariya G. Oshchepkova – research implementation, data processing, graphic design

Oleg B. Oleinikov – research concept, conclusions

Nikolay A. Oparin – data collection, statistical analysis

Alexey P. Zarukin – data collection

Поступила в редакцию / Submitted 21.11.2025

Поступила после рецензирования / Revised 15.12.2025

Принята к публикации / Accepted 24.12.2025

ОЧИСТКА ОТ ПАРНИКОВЫХ ГАЗОВ ОТХОДЯЩИХ ДЫМОВЫХ ГАЗОВ НЕФТЕГАЗОВОГО ПРОИЗВОДСТВА СРЕДНЕБОТОУБИНСКОГО НЕФТЕГАЗОКОНДЕНСАТНОГО МЕСТОРОЖДЕНИЯ В СРЕДЕ ФТОРИДА КАЛЬЦИЯ

М. С. Иванова, К. О. Томский*

Северо-Восточный федеральный университет им. М. К. Аммосова,

г. Якутск, Российская Федерация

*Ims.06@mail.ru

Аннотация

Определение состава пластовых флюидов является основой для дальнейшего изучения практических всех технических и технологических параметров дальнейшей разработки любого месторождения. Особенно актуальным это является для сравнительно недавно разрабатываемых месторождений, для которых период разработки находится на начальных или средних этапах, поскольку последующие этапы разработки и другие мероприятия с этим связанные требуют максимального научного подхода для грамотного достижения запланированных коэффициентов извлечения нефти и газа. При этом одной из основных задач среди множества имеющихся является уменьшение антропогенного влияния неизбежно образующихся при горении любого углеводородного топлива парниковых и кислых газов, таких как оксиды углерода и серы. Количество выбрасываемых газов, влияющих на изменение климата, на сегодняшний день регламентируется как федеральными нормативными актами, так и международными, поэтому утилизация этих газов стоит актуальной задачей для абсолютно всех недропользователей. В работе показаны результаты хроматографического исследования состава попутного нефтяного газа, добываемого на Среднеботуобинском нефтегазоконденсатном месторождении (СБНГКМ). На основании полученных данных определен состав отходящих дымовых газов, получаемых в результате сжигания ПНГ. Проведены экспериментальные исследования по определению оптимальных параметров каталитической очистки продуктов горения углеводородов от диоксидов углерода и серы в среде фторида кальция. В результате проведенной регенерации каталитическая система полностью восстанавливала свои окислительные способности. В работе показана принципиальная возможность проведения каталитической очистки газов горения от кислых газов на примере попутного нефтяного газа Среднеботуобинского НГКМ.

Ключевые слова: состав продуктов горения полезных ископаемых, уменьшение влияния парниковых газов на изменение климата, геохимический состав пластовых газов, хроматография, кислые газы, диоксид серы, флюорит, суспензии фторида кальция, Среднеботуобинское нефтегазоконденсатное месторождение, каталитическая очистка дымовых газов

Для цитирования: Иванова М. С., Томский К. О. Очистка от парниковых газов отходящих дымовых газов нефтегазового производства Среднеботуобинского нефтегазоконденсатного месторождения в среде фторида кальция. *Вестник СВФУ*. 2025;(4): 17-24. DOI: 10.25587/2587-8751-2025-1-17-24

GREENHOUSE GAS TREATMENT FROM OIL AND GAS PRODUCTION OUTLET GASES AT THE SREDNEBOTUOBINSKOYE OIL AND GAS CONDENSATE FIELD IN A CALCIUM FLUORIDE ENVIRONMENT

Maria S. Ivanova, Kirill O. Tomsky*

M. K. Ammosov North-Eastern Federal University,

Yakutsk, Russian Federation

*Ims.06@mail.ru

Abstract

Determining the composition of formation fluids is the basis for further study of virtually all technical and process parameters for the subsequent development of any field. This is especially relevant for relatively recently developed fields, which are in the early or mid-stages of development, since subsequent stages of development and other related activities require a highly scientific approach to effectively achieve the planned oil and gas recovery factors. One of the key challenges among many existing ones is to reduce the anthropogenic impact of greenhouse and acid gases, such as carbon and sulfur oxides, inevitably formed during the combustion of any hydrocarbon fuel. The amount of gases emitted that contribute to climate change is currently regulated by both federal and international regulations, making the utilization of these gases a pressing issue for all subsoil users. This paper presents the results of a chromatographic study of the composition of associated petroleum gas produced at the Srednebotuobinskoye oil and gas condensate field (SBNGCF). Based on the data obtained, the composition of the flue gases resulting from associated petroleum gas combustion was determined. Experimental studies were conducted to determine the optimal parameters for catalytic purification of hydrocarbon combustion products to remove carbon dioxide and sulfur in a calcium fluoride medium. Following regeneration, the catalytic system fully restored its oxidizing capacity. This paper demonstrates the fundamental feasibility of catalytic flue gas purification using associated petroleum gas from the Srednebotuobinskoye oil, gas and condensate field as an example.

Keywords: fossil fuel combustion product composition, mitigating the impact of greenhouse gases on climate change, geochemical composition of reservoir gases, chromatography, acid gases, sulfur dioxide, fluorite, calcium fluoride suspensions, Srednebotuobinskoye oil and gas condensate field, catalytic flue gas purification

For citation: Ivanova M.S., Tomsky K.O. Greenhouse gas treatment from oil and gas production outlet gases at the Srednebotuobinskoye oil and gas condensate field in a calcium fluoride environment. *Vestnik of North-Eastern Federal University. Earth Sciences*. 2025;(4): 17-24. DOI: 10.25587/2587-8751-2025-1-17-24

Введение

Подход к решению вопроса, связанного с экологической составляющей продуктов горения основного источника энергии в мире, полностью зависит от его химического состава. Основной компонент продуктов горения – диоксид углерода является крайне стабильной молекулой, активация которой для дальнейшего использования является довольно сложной задачей. Кроме того, состав выбрасываемых газов может усложняться наличием крайне агрессивных серосодержащих компонентов. Несмотря на уже достигнутые значительные результаты, связанные с утилизацией рассматриваемых газов, сжигание ПНГ на факелах с сопутствующими выбросами CO_2 и SO_2 , является существующей практикой. Особенно остро данный вопрос стоит в труднодоступных месторождениях, которые чаще всего находятся в северных регионах страны, где выбросы парниковых газов оказывают существенное влияние на изменение климата в целом.

Способы очистки продуктов горения углеводородного топлива от кислых газов основаны либо на методах, связанных с каталитическими процессами, либо с сорбционными.

Основной проблемой сорбционных методов является временное улавливание кислых газов, требующее дальнейшего решения, связанного с вовлечением диоксидов углерода и серы

в производство. Каталитические методы одновременно с улавливанием нежелательных компонентов способны образовывать новые вещества, которые могут использоваться в других отраслях промышленности.

Ранее [1] было показано, что фторсодержащие соединения способны выполнять роль активаторов кислорода для использования его в качестве активного окислителя для малоактивной молекулы диоксида углерода и других оксидов. При этом в результате этих реакций были получены вещества, не оказывающие вред окружающей среде.

Расчеты показали [2–7], что промежуточными частицами, позволяющими проводить реакции с рассматриваемыми оксидами, являются гидропероксидная группа $\text{HO}_2\bullet$, которая образуется в результате взаимодействия активного кислорода с водой фторсодержащей системы.

Целью работы является изучение возможности использования фторсодержащей системы на основе фторида кальция для очистки реальной системы, образующейся в результате горения попутного нефтяного газа Среднеботубинского нефтегазоконденсатного месторождения.

Экспериментальная часть

Исследование качественного и количественного состава попутного нефтяного газа, отобранного из СБНГКМ, проводили высокоточным хроматографическим методом по ГОСТ 31371.3-2008. Газ природный. Определение состава методом газовой хроматографии с оценкой неопределенности. Часть 3. Определение водорода, гелия, кислорода, азота, диоксида углерода и углеводородов до C_8 с использованием двух насадочных колонок. Состав газа определяли на газовом хроматографе SHIMADZU GC-2010 Plus.

По полученным расчетным данным была смоделирована искусственная смесь газов с учетом состава газа горения, образующегося из ПНГ СБНГКМ. Испытуемые газы пропускали через систему очистки, основным компонентом которого является адсорбер с CaF_2 . Термобарические условия процесса установили стандартные.

Для поддержания расчетного количества кислых газов в системе скорость подачи газа устанавливали газовым расходомером. Требуемое количество газа регулировали при помощи расходомера газа. Для испытания концентрацию фторида кальция изменяли в пределах от 0.05 M до 1.4 M .

Для поддержания равномерности содержания фторида кальция вследствие гетерогенности системы супензию в постоянном режиме смешивали магнитной мешалкой.

Исследование возможности очистки продуктов горения попутного нефтяного газа СБНГКМ от диоксидов углерода и серы проводили при различных скоростях подачи очищаемых газов от 0.03 до 0.118 л/мин.

Для использования повторно кислорода воздуха в качестве окислительной среды во фториде кальция через сорбент барботировали воздух, после проведенной операции система показала начальные сорбционные способности.

Результаты и их обсуждение

Результаты, полученные при проведении хроматографического анализа попутного нефтяного газа Среднеботубинского НГКМ, представлены ниже (табл. 1).

Таблица 1
Компонентный состав попутного нефтяного газа Среднеботубинского НГКМ

Table 1
Component composition of associated petroleum gas of the Srednebotubinskoye oil and gas condensate field

| Компонент | Мольная доля, % |
|------------------------------------|-----------------|
| He | 0.43 |
| H ₂ | 0.0019 |
| CO ₂ | 0.0134 |
| C ₂ H ₆ | 3.23 |
| O ₂ | 0.0258 |
| N ₂ | 6.35 |
| CH ₄ | 87.63 |
| C ₃ H ₈ | 1.64 |
| i-C ₄ H ₁₀ | 0.016 |
| n-C ₄ H ₁₀ | 0.55 |
| neo-C ₅ H ₁₂ | 0.0035 |
| i-C ₅ H ₁₂ | 0.0166 |
| n-C ₅ H ₁₂ | 0.07 |
| C ₆ H ₁₄ | 0.0104 |
| C ₇ H ₁₆ | 0.0048 |
| n-C ₈ H ₁₈ | 0.0037 |
| R-SH | 0.0008 |

По полученным данным был произведен расчет состава газа, получаемого при горении рассматриваемого попутного нефтяного газа. В результате расчета был получен следующий состав газа горения (табл. 2):

Таблица 2
Состав газа горения Среднеботубинского НГКМ

Table 2
Composition of combustion gas of the Srednebotubinskoye oil and gas condensate field

| Состав продуктов горения, % | |
|-----------------------------|----------|
| He | 2.24 |
| CO ₂ | 5.41 |
| H ₂ O | 10.17 |
| N ₂ | 79.90 |
| O ₂ | 2.21 |
| SO ₂ | 0.000042 |

Как показывают результаты проведенных расчетов, наиболее опасными газами, образующимися в результате горения рассматриваемого попутного нефтяного газа, являются диоксид углерода и диоксид серы.

Кинетические кривые сорбции очищаемых газов при подаче их со скоростью 65 мл/мин показывают, что максимальное количество диоксида серы может быть поглощено 0.4 М суспензией фторида кальция, а количество поглощаемого диоксида углерода незначительно меняется при увеличении концентрации суспензии в 40 раз (рис. 1).

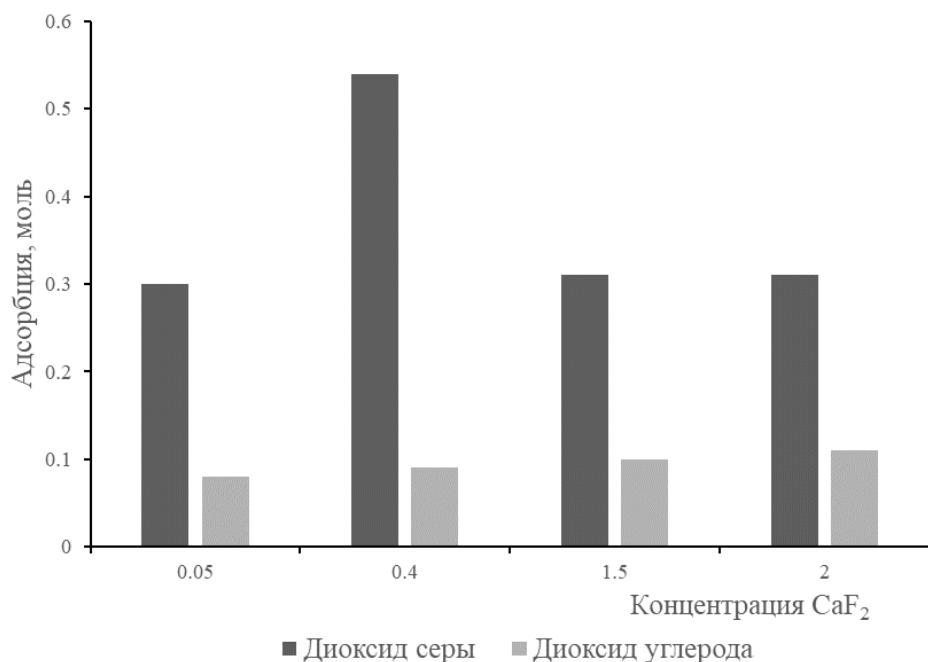


Рис. 1. Адсорбция диоксидов углерода и серы каталитической системой суспензии фторида кальция при различных ее концентрациях

Fig. 1. Adsorption of carbon and sulfur dioxides by the catalytic system of calcium fluoride suspension at various concentrations

Для очистки отходящих дымовых газов рассматриваемого состава в адсорбер подается очищаемый газ, который снизу колонны пропускается через сорбент. Для активации каталитических способностей сорбента подается в колонну сорбции воздух, а очищаемый газ перенаправляется в другую колонну (рис. 2).

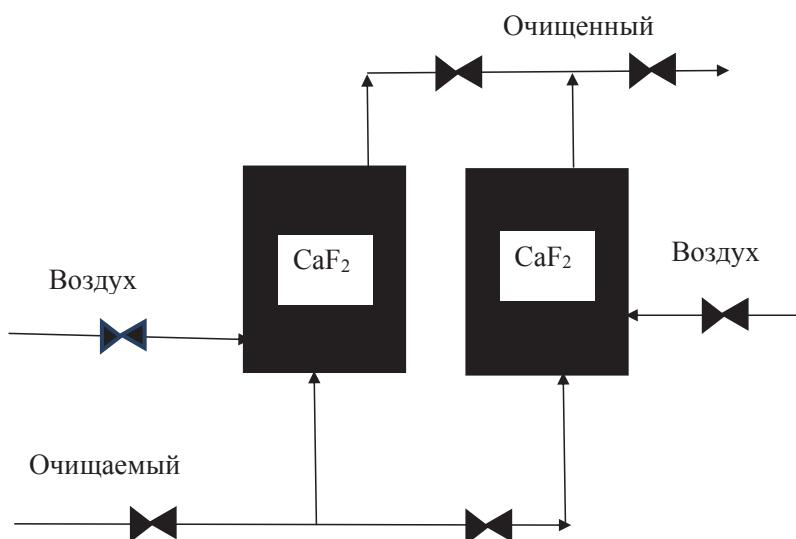


Рис. 2. Технологическая схема каталитической очистки попутного нефтяного газа

Fig. 2. Flow chart of catalytic purification of associated petroleum gas

Заключение

Одной из основных проблем, которые имеются при очистке дымовых газов от кислых газов, образующихся в результате сгорания углеводородного топлива, является то, что диоксиды углерода и серы после очистки необходимо далее утилизировать [8-13]. При этом очень сложной задачей является перевод стабильной молекулы диоксида углерода в реакционно-активную форму.

Ранее в работе [14] было показано, что фторсодержащие среды способны переводить растворенный в себе кислород в активную форму, и далее с образованием промежуточных пероксосоединений в водных растворах диоксид углерода мог переходить в активную форму с образованием, например, щавелевой кислоты.

Но основным недостатком ранее рассмотренных фторсодержащих соединений было то, что система была гомогенной, что в свою очередь всегда вызывает определенные сложности при разделении продуктов реакции и необходимость работы с довольно агрессивными средами.

Особенностью использования суспензий фторидов кальция является то, что такие системы выглядят гораздо привлекательнее с точки зрения возможности быстрого отделения получаемых продуктов, нетоксичности и использования реагентов, которые довольно распространены на территории нашей страны.

Литература

1. Wu Haibo, Chen Wei, Wu Jinhua, Zheng Zhimin, Duan Lunbo. Synergistic Removal of SO_x and NO_x in CO_2 Compression and Purification in Oxy-Fuel Combustion Power Plant. *Energy and Fuels*. 2019; (33) : 12621 – 1262719. DOI:10.1021/acs.energyfuels.9b03284.
2. Антонов К. Л., Поддубный В. А., Маркелов Ю. И. Некоторые итоги мониторинга парниковых газов в арктическом регионе России. *Арктика: экология и экономика*. 2018; (1): 56-67. DOI: 10.25283/2223-4594-2018-1-56-67.
3. Эшмухамедов М. А., Понамарева Т. В., Раевская Е. Г. Очистка газовых выбросов от диоксида серы с помощью активированного гранулированного сорбента. *Химическая безопасность. Chemical safety science*. 2020; (4): 170 – 182. DOI: 10.25514/CHS.2020.1.17012.
4. Хайрулин С.Р., Исмагилов З.Р., Керженцев М.А., Сальников А.В., Логинов Л.И., Филиппов А.Г., Вильданов А.Ф., Мазгаров А.М. Углеродные материалы для очистки газов от сероводорода и перспективы их использования в базовых технологиях очистки попутных нефтяных газов. *Химия в Интересах Устойчивого Развития*. 2018; (6): 679-691. DOI: 10.15372/KhUR20180615.
5. Bellamy Rob, Geden Oliver, Fridahl Mathias, Cox Emily, Palmer James. Editorial: Governing Carbon Dioxide Removal. *Frontiers in Climate*. 2021; (38): № 816346. DOI: 10.3389/fclim.2021.816346.
6. Moustakas Nikolaos G., Lorenz Felix, Dilla Martin, Peppel Tim, Strunk Jennifer. Pivotal Role of Holes in Photocatalytic CO_2 Reduction on TiO_2 . *Chemistry – A European Journal*. 2021; (27): 17213 – 172196. DOI: 10.1002/chem.202103070.
7. Yu Hanbo, Huang Jinhui, Jiang Longbo, Leng Lijian, Yi Kaixin, Zhang Wei, Zhang Chenyu, Yuan Xingzhong. In situ construction of Sn-doped structurally compatible heterojunction with enhanced interfacial electric field for photocatalytic pollutants removal and CO_2 reduction. *Applied Catalysis B: Environmental*. 2021; (2985) : № 120618.
8. Abdollahi M., Larimi A., Jiang Z., Khorasheh F., Ghotbi C. Photocatalytic oxidative desulfurization of model fuel over visible light-active Cu-impregnated carbon-doped TiO_2 . *Journal of Cleaner Production*. 2022; (380) : № 134968.
9. Kong Zhe, Xue Yi, Hao Tianwei, Wu Jiang, Zhang Yanlong, Rong Chao, Chen Hong, Song Liuying, Li, Dapeng, Pan, Yang, Li Yu-You. Carbon-neutral treatment of N, N-dimethylformamide-containing wastewater by up-flow anaerobic sludge blanket: CO_2 reduction and bio-energy cleaner production. *Journal of Cleaner Production*. 2022; (38020): № 134880.
10. Abhishek Kumar, Shrivastava Anamika, Vimal Vineet, Gupta Ajay Kumar, Bhujbal Sachin Krushna, Biswas Jayanta Kumar, Singh, Lal, Ghosh, Pooja, Pandey, Ashok, Sharma, Prabhakar, Kumar Manish. Biochar application for greenhouse gas mitigation, contaminants immobilization and soil fertility enhancement: A state-of-the-art review. *Science of the Total Environment*. 2022; (85320) : № 158562.

11. Ozcan Merve Celik, Karaman Birce Pekmezci, Oktar Nuray, Dogu Timur. Dimethyl ether from syngas and effect of CO_2 sorption on product distribution over a new bifunctional catalyst pair containing STA@SBA-15. *Fuel*. 2022; (33015) : (125607).
12. Zhang Yan, Wibowo Haryo, Zhong Li, Horttanainen Mika, Wang Zunbo, Yu Caimeng, Yan Mi. Cu-BTC-based composite adsorbents for selective adsorption of CO_2 from syngas. *Separation and Purification Technology*. 2021; (27915): 119644.
13. Alkhatib Ismail I.I., Khalifa Omar, Bahamon Daniel, Abu-Zahra Mohammad R.M., Vega Lourdes F. Sustainability criteria as a game changer in the search for hybrid solvents for CO_2 and H_2S removal. *Separation and Purification Technology*. 2021; (27715) : № 119516.
14. Вишнечская М.В., Мельников М.Я. Особенности превращения органических и неорганических веществ в трифторуксусной кислоте. *Журнал физической химии*. 2016; (90): 1434. DOI: 10.7868/S0044453716090314.

References

1. Wu Haibo, Chen Wei, Wu Jinhua, Zheng Zhimin, Duan Lunbo. Synergistic Removal of SO_x and NO_x in CO_2 Compression and Purification in Oxy-Fuel Combustion Power Plant. *Energy and Fuels*. 2019; (33):12621–126219. DOI:10.1021/acs.energyfuels.9b03284.
2. Antonov K.L., Poddubny V.A., Markelov Yu.I. Some results of greenhouse gas monitoring in the Arctic region of Russia. *Arctic: Ecology and Economy*. 2018;(1):56–67 (in Russian). DOI: 10.25283/2223-4594-2018-1-56-67.
3. Eshmukhamedov M.A., Ponomareva T.V., Raevskaya E.G. Cleaning gas emissions from sulfur dioxide using an activated granular sorbent. *Chemical safety. Chemical safety science*. 2020;(4):170–182 (in Russian). DOI: 10.25514/CHS.2020.1.17012.
4. Khairulin S.R., Ismagilov Z.R., Kerzhentsev M.A., et al. Carbon materials for gas purification from hydrogen sulfide and prospects for their use in basic technologies for cleaning associated petroleum gases. *Chemistry for Sustainable Development*. 2018;(6):679–691 (in Russian). DOI: 10.15372/KhUR20180615.
5. Bellamy Rob, Geden Oliver, Fridahl Mathias, et al. Editorial: Governing Carbon Dioxide Removal. *Frontiers in Climate*. 2021;(38): No. 816346. DOI: 10.3389/fclim.2021.816346.
6. Moustakas Nikolaos G., Lorenz Felix, Dilla Martin, et al. Pivotal Role of Holes in Photocatalytic CO_2 Reduction on TiO_2 . *Chemistry – A European Journal*. 2021;(27):17213–172196. DOI: 10.1002/chem.202103070.
7. Yu Hanbo, Huang Jinhui, Jiang Longbo, et al. In situ construction of Sn-doped structurally compatible heterojunction with enhanced interfacial electric field for photocatalytic pollutants removal and CO_2 reduction. *Applied Catalysis B: Environmental*. 2021;(2985):No. 120618.
8. Abdollahi M., Larimi A., Jiang Z., et al. Photocatalytic oxidative desulfurization of model fuel over visible light-active Cu-impregnated carbon-doped TiO_2 . *Journal of Cleaner Production*. 2022;(380):No. 134968.
9. Kong Zhe, Xue Yi, Hao Tianwei, et al. Carbon-neutral treatment of N, N-dimethylformamide-containing wastewater by up-flow anaerobic sludge blanket: CO_2 reduction and bio-energy cleaner production. *Journal of Cleaner Production*. 2022;(38020):No. 134880.
10. Abhishek Kumar, Shrivastava Anamika, Vimal Vineet, et al. Biochar application for greenhouse gas mitigation, contaminants immobilization and soil fertility enhancement: A state-of-the-art review. *Science of the Total Environment*. 2022;(85320):No. 158562.
11. Ozcan Merve Celik, Karaman Birce Pekmezci, Oktar Nuray, Dogu Timur. Dimethyl ether from syngas and effect of CO_2 sorption on product distribution over a new bifunctional catalyst pair containing STA@SBA-15. *Fuel*. 2022;(33015):(125607).
12. Zhang Yan, Wibowo Haryo, Zhong Li, et al. Cu-BTC-based composite adsorbents for selective adsorption of CO_2 from syngas. *Separation and Purification Technology*. 2021;(27915):119644 .
13. Alkhatib Ismail I.I., Khalifa Omar, Bahamon Daniel, et al. Sustainability criteria as a game changer in the search for hybrid solvents for CO_2 and H_2S removal. *Separation and Purification Technology*. 2021;(27715):No.119516.
14. Vishnetskaya M.V., Melnikov M.Ya. Features of the transformation of organic and inorganic substances in trifluoroacetic acid. *Russian Journal of Physical Chemistry*. 2016;(90):1434 (in Russian). DOI: 10.7868/S0044453716090314.

Об авторах

ИВАНОВА Мария Сергеевна – к.х.н., доц. кафедры «Недропользование» геологоразведочного факультета Северо-Восточного федерального университета имени М. К. Аммосова, ORCID: 0000-0003-3272-9253, ResearcherID: G-1759-2014, Scopus Author ID: 7202135803, SPIN: 7978-1491

e-mail: ims.06@mail.ru

ТОМСКИЙ Кирилл Олегович – к.т.н., доц., и.о. зав. кафедрой «Недропользование» геологоразведочного факультета Северо-Восточного федерального университета имени М. К. Аммосова, ORCID: 0000-0001-7612-5393, ResearcherID: AAP3745-2020, Scopus Author ID: 57191432762, SPIN: 8266-5598

e-mail: kirilltom@mail.ru

About the authors

Maria S. IVANOVA – Cand. Sci. (Chemistry), Associate Professor, M. K. Ammosov North-Eastern Federal University, Yakutsk, Russian Federation, ORCID: 0000-0003-3272-9253, ResearcherID: 7202135803, Scopus Author ID: 7202135803, SPIN: 7978-1491, e-mail: ims.06@mail.ru

e-mail: ims.06@mail.ru

Kirill O. TOMSKY – Cand. Sci. (Engineering), Associate Professor, Head of Department, M. K. Ammosov North-Eastern Federal University, ORCID: 0000-0001-7612-5393, ResearcherID: AAP3745-2020, Scopus Author ID: 57191432762, SPIN: 8266-5598

e-mail: kirilltom@mail.ru

Вклад авторов

Иванова М. С. – разработка концепции, методология, проведение исследования, анализ данных.

Томский К. О. – верификация данных, анализ полученных данных.

Authors' contribution

Maria S. Ivanova – concept development, methodology, research implementation, data analysis.

Kirill O. Tomsky – data verification, data analysis.

Конфликт интересов

Авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов

Conflict of interests

The authors declare no relevant conflict of interests

Поступила в редакцию / Submitted 24.11.2025

Поступила после рецензирования / Revised 01.12.2025

Принята к публикации / Accepted 24.12.2025

ДИФФЕРЕНЦИРОВАННАЯ ОЦЕНКА ПЕРСПЕКТИВ НЕФТЕГАЗОНОСНОСТИ БОРТОВ ВИЛЮЙСКОЙ СИНЕКЛИЗЫ

А. И. Калинин¹, А. И. Сивцев^{2*}

¹Федеральный исследовательский центр «Якутский научный центр Сибирского отделения Российской академии наук», обособленное подразделение Институт проблем нефти и газа СО РАН, Якутск, Россия

²Северо-Восточный федеральный университет им. М.К. Аммосова, Якутск, Россия

*maraday@yandex.ru

Аннотация

Отмечена актуальность вопроса наращивания объемов сырьевой базы углеводородов в Вилюйской синеклизе для экстенсивного развития нефтегазодобывающих компаний. Кратко даны литолого-стратиграфическая характеристика верхнепалеозойско-мезозойских отложений синеклизы и их история геологического развития. Выделены основные нефтегазоматеринские толщи и связанные с ними нефтегазоносные комплексы. На основе пространственно-временной модели истории погружения осадочных пород Вилюйской синеклизы ретроспективно определены градации катагенеза и интенсивность генерации нефти и газа по пермским и нижнеюрским нефтематеринским отложениям. Количественно оценен потенциал нефтегазогенерации пермских и нижнеюрских нефтематеринских отложений в 100 млрд. тонн условных углеводородов. С учетом коэффициента аккумуляции сделан вывод, что на территории Вилюйской синеклизы можно обнаружить месторождения с суммарными запасами до 10 млрд. тонн условных углеводородов. С позиций близости от зон генерации и заполненности под замок близлежащих месторождений на антиклинальных структурах в качестве наиболее перспективного на обнаружение газовых месторождений выделена территория северо-западного борта Вилюйской синеклизы. Предположено, что здесь возможно развитие двух типов ловушек на структурах выклинивания: на перекрытии пермо-триасовых резервуаров нижнеюрскими глинистыми отложениями; на угловых несогласиях между пермскими и триасовыми отложениями. Исходя из выявленной В.Д. Наливкиным (1971) приуроченности нефтяных месторождений к унаследованным структурам выделены прилегающие к Вилюйской синеклизе склоны Сунтарского, Мунского и Якутского сводов как территории перспективные на обнаружение месторождений нефти. Приведены прямые и косвенные показатели перспектив нефтегазоносности указанных территорий. Подчеркнута необходимость постановки первоочередных геологоразведочных работ на рекомендованных территориях для ускоренного воспроизводства сырьевой базы углеводородов в Вилюйской синеклизе.

Ключевые слова: Вилюйская синеклиза, сырьевая база углеводородов, нефтегазоматеринские отложения, история геологического развития, пермские отложения, нижнеюрские отложения, катагенез, генерация битумоидов, перспективы нефтегазоносности

Для цитирования: Калинин А.И., Сивцев А.И. Дифференцированная оценка перспектив нефтегазоносности бортов Вилюйской синеклизы. *Вестник СВФУ*. 2025;(4): 25-43. DOI: 10.25587/2587-8751-2025-1-25-43

DIFFERENTIATED ASSESSMENT OF THE OIL AND GAS POTENTIAL OF THE SIDES OF THE VILYUI SYNECLISE

Alexander I. Kalinin¹, Aleksei I. Sivtsev^{2}*

¹Federal Research Center “Yakutsk Scientific Center of the Siberian Branch of the Russian Academy of Sciences”, separate division Institute of Oil and Gas Problems SB RAS,

Yakutsk, Russia

² M.K. Ammosov North-eastern Federal University, Yakutsk, Russia

*maraday@yandex.ru

Abstract

The urgency of the issue of increasing the volume of the hydrocarbon raw material base in the Vilyui syneclyse was noted. The lithological and stratigraphic characteristics of the Upper Paleozoic-Mesozoic syneclyse deposits and are briefly given. The main oil and gas complexes are identified. Based on a model of the history of sedimentary rock subsidence in the Vilyui syneclyse, the gradations of catagenesis and the intensity of oil and gas generation on the Permian and Lower Jurassic oil source deposits were determined. The potential of oil and gas generation of the Permian and Lower Jurassic oil source deposits was quantified. Taking into account the accumulation coefficient, it is concluded that deposits with total reserves of up to 10 billion tons of conditional hydrocarbons can be found on the territory of the Vilyui syneclyse. The territory of the north-western side of the Vilyui syneclyse was identified as the most promising for the discovery of gas fields. It is assumed that two types of traps on pinching-out structures may develop here. Based on the identification by V. D. Nalivkin (1971) of the confinedness of oil fields with inherited structures, the slopes of the Suntar, Munsky, and Yakut arches adjacent to the Vilyui syneclyse as promising territories for the discovery of oil deposits were identified. The direct and indirect indicators of the oil content prospects of these territories are given. The need to queue up first-priority geological exploration in the recommended territories in the Vilyui syneclyse was emphasized.

Keywords: Vilyui syneclyse, hydrocarbon raw material base, oil and gas source formations, history of geological development, Permian deposits, Lower Jurassic deposits, catagenesis, bitumoid generation, oil and gas content prospects

For citation: Kalinin A.I., Sivtsev A.I. Differentiated assessment of the oil and gas potential of the sides of the Vilyui syneclyse. *Vestnik of North-Eastern Federal University. Earth Sciences.* 2025;(4): 25-43. DOI: 10.25587/2587-8751-2025-1-25-43

Введение

В настоящее время в пределах Вилюйской синеклизы открыто 11 газовых и газоконденсатных месторождений с суммарными геологическими запасами природного газа около одного трлн.м³. При этом Мастахское месторождение по отдельным залежам выработано, а Средневилюйское находится на второй стадии разработки. Среднетунгское месторождение разрабатывается незначительными объемами (до 5 млн.м³ в год) по локальному участку принадлежащей АО «Сахатранснефтегаз». Нижневилюйское, Бадаранское, Соболох-Неджелинское, Толонское, Эвальда Туги, Хайлахское, Нижнетюкянское и Андылахское месторождения находятся на различных стадиях разведки.

Сырьевая база разрабатываемых месторождений Вилюйской синеклизы служит надежным источником энергетического сырья для центральных районов Республики Саха (Якутия). Вместе с тем ограниченность рынка потребления и закрытость газотранспортной сети не позволяют в полной силе монетизировать газовые активы разрабатываемых месторождений, и вовлекать в разработку разведываемые месторождения. Для обеспечения инвестиционных проектов по выходу на внешние рынки реализации газа Вилюйской синеклизы необходимо существенное увеличение запасов углеводородного сырья.

В рамках данной работы предпринята попытка оценки потенциального углеводородного потенциала верхнепалеозойско-мезозойских отложений Вилюйской синеклизы на основе объемно-генетического метода.

Краткая характеристика геологического строения и нефтегазоносности

Согласно действующей схемы нефтегазогеологического районирования Сибирской платформы Вилюйская синеклиза входит в состав Лено-Вилюйской нефтегазоносной провинции. Она представляется как одна из самых крупных и глубоких депрессий востока Сибирской платформы. В тектоническом плане Вилюйская синеклиза на юге граничит Алданской антеклизой, на юго-западе – с Предпатомским прогибом, на западе – с Непско-Ботуобинской антеклизой, на северо-западе – с Сюгджерской седловиной, на севере – с Анабарской антеклизой, на востоке плавно переходит в Предверхоянский прогиб (рис. 1).



Рис. 1. Обзорная тектоническая схема Вилюйской синеклизы

Условные обозначения: 1 – Лено-Вилюйская нефтегазоносная провинция; 2 – Западно-Вилюйская нефтегазоносная область Лено-Тунгусской нефтегазоносной провинции; границы: 3 – надпорядковых структур, 4 – структур I-II порядка; месторождения: 5 – газоконденсатные, 6 – газовые, обозначение тектонических элементов: ЛВ – Логлорский мегавал, ТВ – Тангнарынская впадина, ХВ – Хапчагайский мегавал.

Fig. 1. Overview tectonic scheme of the Vilyui syncline

Symbols: 1 – Lena-Vilyui oil and gas province; 2 – West-Vilyui oil and gas area of the Lena-Tunguska oil and gas province; boundaries: 3 – superorder structures, 4 – structures of the I-II order; deposits: 5 – gas-condensate, 6 – gas, designation of tectonic elements: LM – Loglor megaswell, TD – Tangnaryn depression, KM – Khapchagai Megaswell.

Бурением разрез Вилюйской синеклизы изучен на глубину 6519 м до верхнекаменноугольных отложений и сложен толщами неравномерного переслаивания терригенных пород морского, прибрежно-морского и континентального генезиса. На рисунке 2 представлено стратиграфическое расчленение разреза скважины № 27, пробуренной в пределах центральной части Средневилюйского газоконденсатного месторождения.

В позднепалеозойско-раннемезозойское время это была территория приморской низменности, периодически становившаяся ареной режима накопления морских и мелководно-морских отложений (отдельные пласти каменноугольного, пермского, триасового и юрского возрастов)

и пород континентального генезиса аллювиальных, озерно-болотных фаций. Существенная часть разреза континентальных отложений является угленосной. Для всех частей разреза характерно возрастание толщин отложений при движении с запада на восток, а также к осевой части синеклизы от ее северного и южного бортов. Суммарная толщина отложений этого возраста достигает 6-7 км в восточной части.

В структурно-историческом плане синеклиза в позднем палеозое – нижнем мезозое представляла собой континентальную часть позднепалеозойской-нижнемезозойской пассивной континентальной окраины Оймяконского океанического бассейна [1, 2]. Отличительной чертой для морских и прибрежно-морских отложений разреза синеклизы является их фациальная выдержанность (неджелинская, таганджинская и мономская свиты нижнего триаса, сунтарская свита нижней юры).

Рис. 2. Стратиграфический разрез скважины № 27

Fig. 2. Stratigraphic section of well No. 27

В разрезе верхнепалеозойских и мезозойских отложений Вилюйской синеклизы выделяются пермотриасовый, нижнетриасовый и нижнеюрский основные продуктивные комплексы. Наибольшее количество месторождений и, соответственно запасов газа и конденсата сосредоточено в Хапчагайском и Логлорском валах – относительно хорошо изученных территориях. Тематическими исследованиями были показаны незначительные по толщине и запасам нефтяные оторочки в ряде месторождений Хапчагайского мегавала с суммарными геологическими запасами нефти около 50 млн. тонн [3, 4].

Геотермическими исследованиями [5] установлено, что мощность толщи мерзлых пород в пределах Вилюйской синеклизы варьирует от 50 до 680 м. Отмечается увеличение толщины мерзлых пород на северном и западном направлениях.

Основными нефтегазоматеринскими отложениями в Вилюйской синеклизе считаются пермские отложения. Исследованию рассеянного органического вещества пермских отложений Вилюйской синеклизы посвящены работы ряда исследователей [1, 6-8]. Кроме того, определенный потенциал по генерации УВ связывается с нижнеюрскими отложениями [9-11].

На основе материалов глубокого бурения и данных сейсморазведки были построены ретроспективные структурные карты пермских и нижнеюрских отложений на определенные стратиграфические уровни и даны оценки их генерационного потенциала.

Пространственно-временная модель истории погружения нефтематеринских отложений Вилюйской синеклизы

Пермские отложения. Пермское время

В пермское время осадконакопление происходило в условиях аккумулятивной равнины. В раннепермскую эпоху равнина периодически представляла собой опресненный морской бассейн [1]. В конце пермского периода территория становится ареной накопления паралической угленосной формации. Толщина пермских отложений достигает 4 км и более. Всего в пермское время отложилось порядка 249483 км³ осадков. В это время, возможно с захватом позднекаменноугольного времени, происходило заложение современной Вилюйской синеклизы. Отличительной чертой тектонических движений этой стадии является их глыбовый характер по системам глубинных разломов. Происходит интенсивное погружение центральной осевой части Вилюйской синеклизы.

Градации катагенеза и интенсивность генерации нефти и газа по глубинным интервалам оценены с учётом результатов исследований А.Э. Конторовича [13] – рис. 3.

На рис. 4 представлена динамика катагенетических преобразований РОВ и пород пермского возраста. Здесь палеотемпературы и значения коэффициента открытой пористости (Кп) определялись по методике [1].

В конце пермского времени отложения перми в пределах преобладающей части Вилюйской синеклизы не вышли из подстадии ПК – более 84 % от всего объема. Только в осевой части синеклизы в область градаций МК₁ и МК₂ попадало 37408 км³ осадков перми, что составляло всего около 15 % от всего объема пермских отложений. МК₃ – 0,5 %. В устьевой части современного р. Вилюя совсем незначительная нижняя часть разреза пермских отложений находилась на глубинах растворения песчаников (менее 0,01 %). Степень постседиментационного преобразования пермских песчаников на конец пермского времени было невысокой – они не вышли из зоны механического уплотнения (градиент снижения Кп/1000м 7-9 %), коэффициент открытой пористости (Кп) на глубинах до 3 км – 20-25 % (рис. 4).

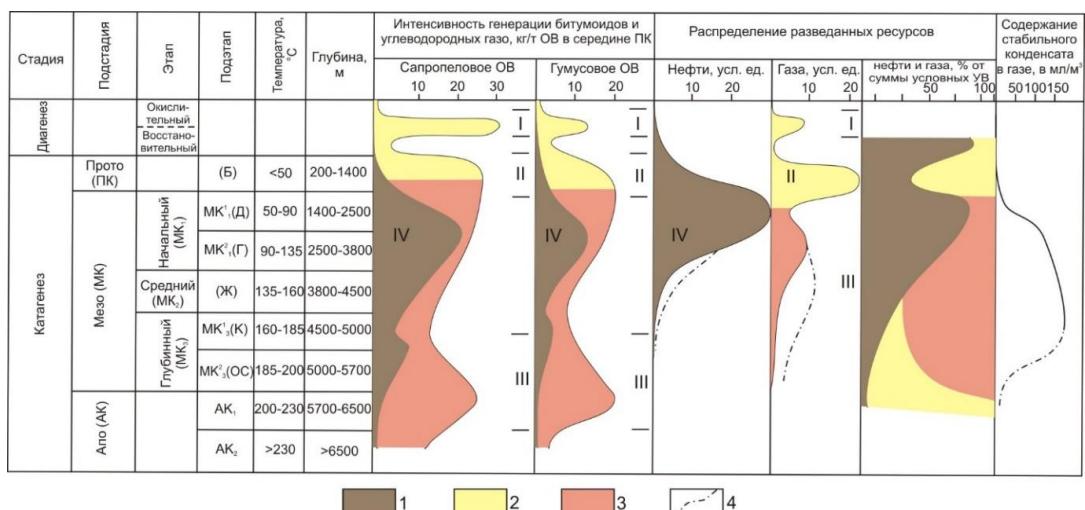


Рис. 3. Интенсивность генерации нефти и газа и распределение их ресурсов в стратисфере.

Составили А.Э. Конторович, А.А. Трофимук (1976) с использованием материалов А.М. Акрамходжаева, Н.Б. Вассоевича и др.

Условные обозначения: 1 – нефть и битумоиды; 2,3 – углеводородные газы: 2 – CH_4 , 3 – $\text{C}_2\text{H}_6\text{-C}_5\text{H}_{12}$; 4 – предполагаемое распределение ресурсов при достижении уровня разведанности глубин 1-3 км, I – диагенетическая зона интенсивного газообразования и зона накопления гидратов газов; II – верхняя зона интенсивного газообразования и газонакопления; III – глубинная зона интенсивного газообразования и газонакопления; IV – главная зона нефтеобразования.

Fig. 3. The intensity of oil and gas generation and the distribution of their resources in the stratosphere.

Compiled by A.E. Kontorovich, A.A. Trofimuk (1976) using materials by A.M. Akramkhodzhaev, N.B. Vassoevich, et al.

Symbols: 1 – oil and bitumoids; 2,3 – hydrocarbon gases: 2 – CH_4 , 3 – $\text{C}_2\text{H}_6\text{-C}_5\text{H}_{12}$; 4 – estimated resource distribution when the exploration degree reaches depths of 1-3 km, I – diagenetic zone of intense gas formation and zone of accumulation of gas hydrates; II – upper zone of intensive gas formation and gas accumulation; III – deep zone of intensive gas formation and gas accumulation; IV – the main oil formation zone.

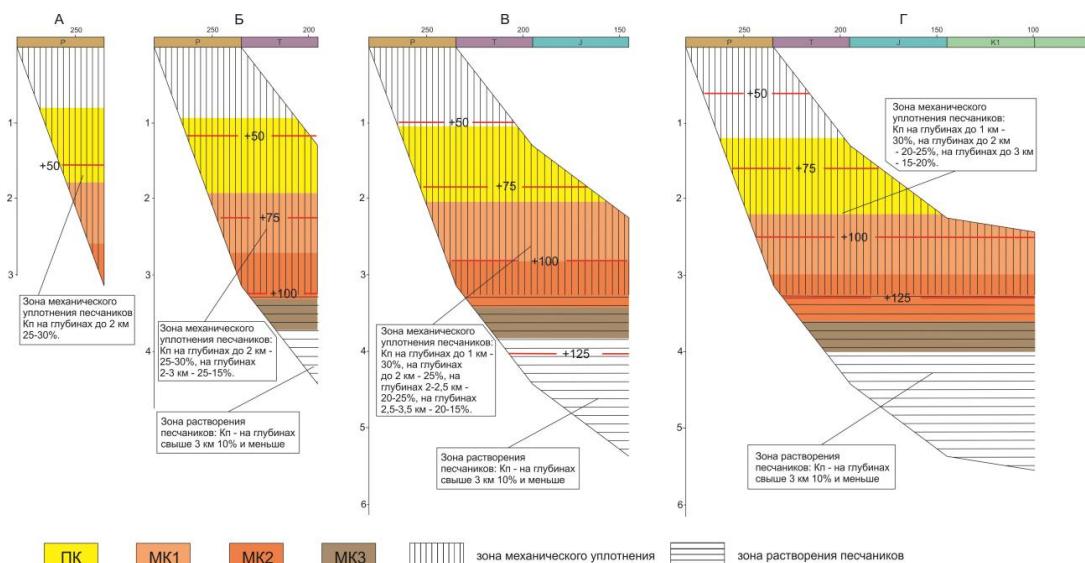


Рис. 4. Динамика катагенетических преобразований РОВ и пород пермского возраста.

Условные обозначения: а) окончание пермской седиментации, б) окончание триасовой седиментации, в) окончание юрской седиментации, г) окончание нижнемеловой седиментации (по Сафонову А.Ф., 1992).

Fig. 4. Dynamics of catagenetic transformations of dispersed organic matter and Permian rocks.

Symbols: a) end of the Permian sedimentation, b) end of the Triassic sedimentation, c) end of the Jurassic sedimentation, d) end of the Lower Cretaceous sedimentation (according to Safronov A.F., 1992).

Исходя из толщин пермских отложений Вилюйской синеклизы (рис. 5) определены объемы пермских отложений (программное обеспечение Surfer 8) испытавших термобарические условия стадий катагенеза от МК₁ до МК₃ на окончание пермской седиментации:

ПК₁ (1200-2200 м) – 60324 км³

МК₁ (2200-3000 м) – 29639 км³

МК₂ (3000-3600 м) – 7768 км³

МК₃ (3600-4000 м) – 1365 км³

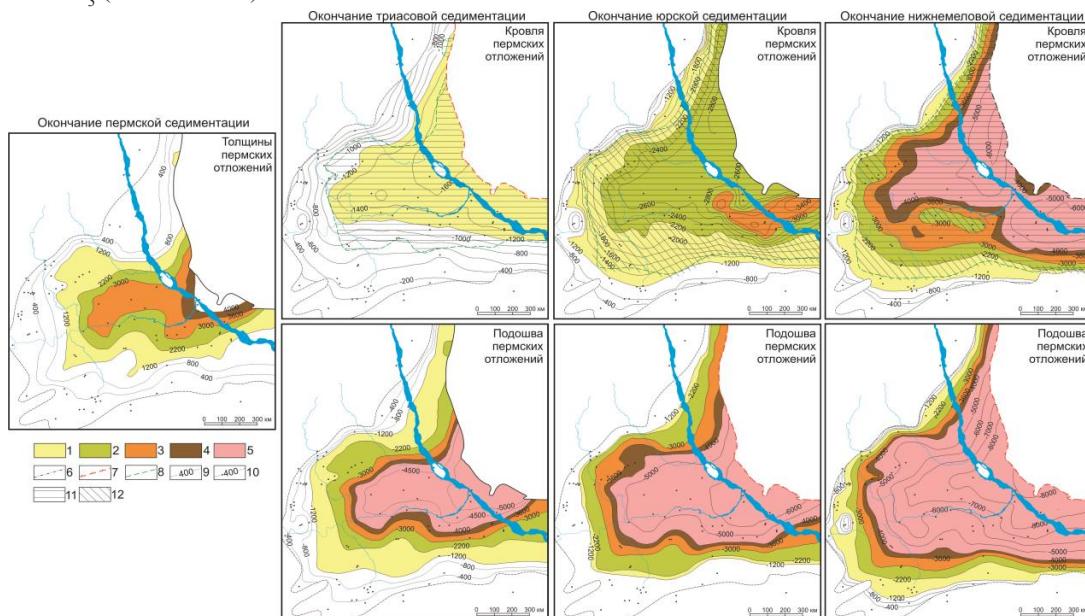


Рис. 5. Динамика изменения структурных планов подошвы и кровли пермских отложений Вилюйской синеклизы в позднепалеозойско-мезозойское время с приведением катагенетических уровней их преобразованности.

Условные обозначения: градации катагенеза: 1 – ПК, 2 – МК₁, 3 – МК₂, 4 – МК₃, 5 – зона растворения песчаников, 6 – линия выклинивания пермских отложений, 7 – современная граница складчатой области, 8 – проекция главной зоны нефтеобразования по подошве пермских отложений, 9 – изолинии равных толщин и их величина, 10 – изолинии глубин залегания, 11 – главная зона нефтеобразования, 12 – потенциальные зоны нефтенакопления.

Fig. 5. Dynamics of changes in the structural plans of the bottom and roof of the Permian deposits of the Vilyui Syncline in the Upper Paleozoic-Mesozoic time with the catagenetic levels of their transformation.

Symbols: 1 – PC, 2 – MC₁, 3 – MC₂, 4 – MC₃, 5 – the sandstone dissolution zone, 6 – the wedging line of the Permian sediments, 7 – the modern boundary of the folded area, 8 – projection of the main oil formation zone along the bottom of the Permian sediments, 9 – isolines of equal thickness and their size, 10 – depth isolines, 11 – the main oil formation zone, 12 – potential oil accumulation zones.

Пермские отложения. Триасовое время

В раннем триасе накопление осадков происходило преимущественно в условиях мелководного опресненного морского бассейна, в среднем-позднем триасе – преимущественно в условиях прибрежной аллювиальной равнины [1]. Толщина триасовых отложений составляет 3-3,5 км. Стадия характеризуется общим погружением Вилюйской синеклизы.

В пределах синеклизы практически в современных границах обособляется и интенсивно развивается Линденская впадина. В это время начинает проявляться территория современной Лунхино-Келинской впадины. На месте заложившегося в позднем палеозое крупного поперечного Хапчагай-Тангнаринского поднятия в триасе обособился структурный выступ, пространственно совпадающий с местоположением современного Хапчагайского мегавала. На северо-

западном борту синеклизы слабоамплитудными структурами проявились Сынгдинская полу-впадина и Среднетунгский структурный мыс [14].

В конце триасового времени (примерно через 40 млн. лет после завершения пермского осадконакопления) на градациях МК₁ и МК₂ находилась треть объема пермского разреза (34 %), в МК₃ – 6,5 %, в центральной части на глубины растворения песчаников опустилось около 9,5 % отложений перми. Не вышли из подстадии ПК 50 % пермо-триасовых отложений, из которых на триасовые отложения приходится около 7 % (43 %+7 %). Преобладающая часть пермских отложений Вилюйской синеклизы, находились все еще в зоне механического уплотнения – Кп – 25-30 % на глубинах до 2 км и 15-25 на глубинах 2-3 км (рис. 3). Только 16 % осадков в нижней части разреза опустилось в зону растворения песчаников с пористостью 10 % и менее.

Ретроспективные реконструкции динамики погружения пермских отложений Вилюйской синеклизы на конец триасового времени (рис. 5) позволили определить объем пермских отложений, испытавших термобарические условия стадий катагенеза от МК₁ до МК₃:

ПК₁ (1200-2200 м) – 86757 км³

МК₁ (2200-3000 м) – 54992 км³

МК₂ (3000-3600 м) – 30182 км³

МК₃ (3600-4000 м) – 16286 км³

Пермские отложения. Юрское время

Доверхнеюрское время седиментация происходила в условиях прибрежной равнины, периодически заливавшейся мелководным нормально-соленым морем [1]. Широкое площадное распространение юрских отложений свидетельствует о расширении бассейна осадконакопления в этот период развития. На востоке от рассматриваемой территории в конце юры начинает формироваться Северо-Верхоянский мегантиклинорий, обуславливая накопление лимнической угленосной формации в пределах Вилюйской синеклизы. Толщина юрских отложений сравнительно небольшая 1,2-1,6 км, в самых пониженных участках возможно до 2 км. Морфологически обособливаются Логлорский и Байский структурные мысы, начинает оформляться Быраканский структурный мыс. Более интенсивному опусканию подвергается территория современной Лунхино-Келинской впадины. В целом юрский период характеризуется относительно слабой тектонической активностью [14].

В конце юрского периода (через примерно 80 млн. лет после завершения пермского осадконакопления) пермские отложения на глубинах, соответствующих градациям катагенеза РОВ МК₁ и МК₂ находилось чуть более 40 % пермских отложений. Кп сохраняются все еще достаточно высокими – на глубинах до 3,5 км – Кп 15-20 % (рис. 4).

Ретроспективные реконструкции динамики погружения пермских отложений Вилюйской синеклизы на конец юрского времени (рис. 5) позволили определить объем пермских отложений, испытавших термобарические условия стадий катагенеза от МК₁ до МК₃:

ПК₁ (1200-2200 м) – 29786 км³

МК₁ (2200-3000 м) – 54730 км³

МК₂ (3000-3600 м) – 47285 км³

МК₃ (3600-4000 м) – 26434 км³

Пермские отложения. Раннемеловое время

Это время захлопывания Оймяконского океанического бассейна в результате коллизии Сибирского континента со структурой Колымо-Омолойского блока, в результате которой произошли скучивание и деформация осадочной линзы восточной пассивной континентальной востока Сибирского континента [1, 2].

В конце раннемелового времени (примерно через 130 млн. лет после завершения пермской седиментации) глубинная зональность катагенетической пермских отложений была примерно следующей: ПК – 1200-2200 м, МК₁ – 2200-3000 м, МК₂ – 3000-3600 м, на глубинах до 4000 м – МК₃. Всего на стадиях М₁ и МК₂ находилось уже всего 14 % осадков перми.

В течение раннемелового времени песчаники пермского возраста, погруженные на глубины свыше 3300-3500 м подвергаются процессам перекристаллизации, формирования мозаичных структур, происходит трансформация монтмориллонитов через смешанослойную фазу в гирослюдю – градиент снижения Кп 3-4 % /1000м, Кп – не выше 10 % (рис. 4).

И так, в течение, как минимум, почти 100-130 млн лет весь объем пермских отложений Вилуйской синеклизы находился в термобарических условиях генерации жидких УВ.

Ретроспективные реконструкции динамики погружения пермских отложений Вилуйской синеклизы на конец нижнемелового времени (рис. 5) позволили определить объем пермских отложений, испытавших термобарические условия стадий катагенеза от МК₁ до МК₃:

ПК₁ (1200-2200 м) – 10769 км³

МК₁ (2200-3000 м) – 15804 км³

МК₂ (3000-3600 м) – 20286 км³

МК₃ (3600-4000 м) – 16628 км³

Нижнеюрские отложения (сунтарская свита). Юрское время

Особенности осадконакопления в Вилуйской синеклизе в юрское время приведены выше – в истории погружения пермских отложений. Степень постседиментационного преобразования юрских песчаников на конец юрского времени было невысокой – они не вышли из зоны механического уплотнения (градиент снижения Кп/1000м 7-9 %), коэффициент открытой пористости (Кп) на глубинах до 1,6 км – 25-30 % (рис. 6).

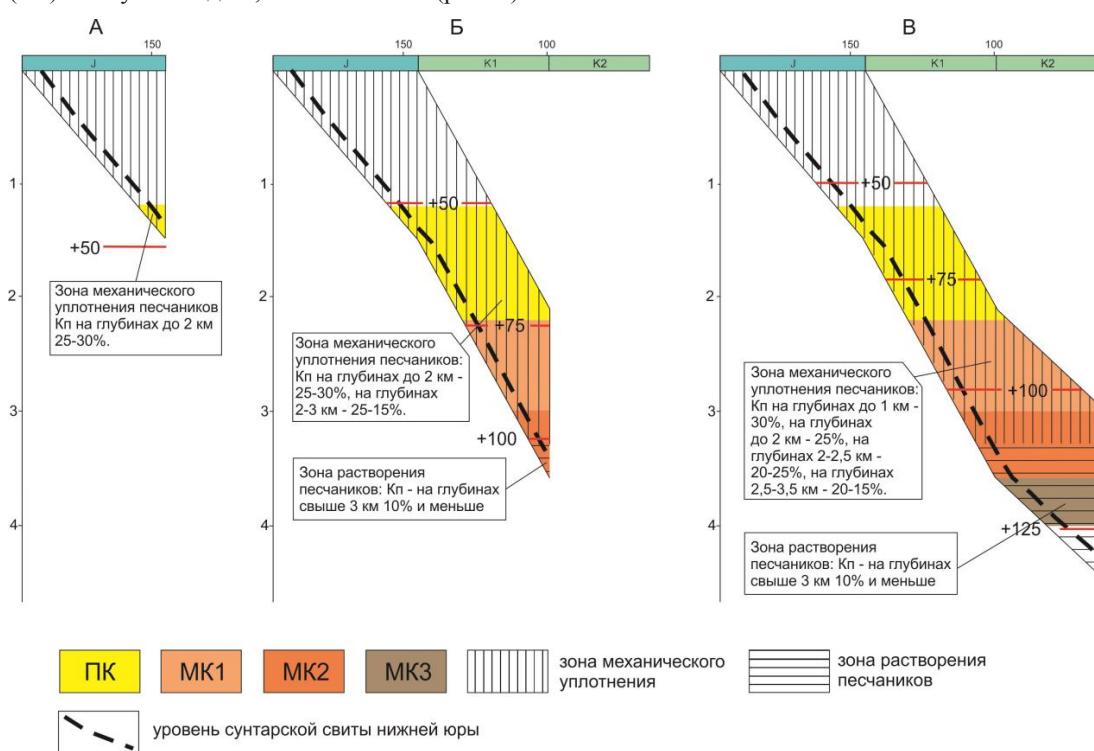


Рис. 6. Динамика катагенетических преобразований РОВ и пород юрского (сунтарской свиты) возраста.

Условные обозначения: а) окончание юрской седиментации, б) окончание нижнемеловой седиментации, в) окончание меловой седиментации (по Сафонову А.Ф., 1992).

Fig. 6. Dynamics of catagenetic transformations of dispersed organic matter and rocks of the Jurassic (Suntar formation) age.

Symbols: a) end of the Jurassic sedimentation, b) end of the Lower Cretaceous sedimentation, c) end of the Cretaceous sedimentation (according to Safronov A.F., 1992).

Всего в объеме сунтарской свиты в пределах границ современной Вилуйской синеклизы было отложено 11 763 км³ осадков. В конце юрского периода развития в подстадио ПК вошли только 544,7 км³ осадков сунтарской свиты (4,6 %). Стадию МК₁ ни один кубометр сунтарской свиты еще не вошел:

ПК₁ (1200-2200 м) – 544,7 км³.

Нижнеюрские отложения (сунтарская свита). Раннемеловое время

Особенности осадконакопления в Вилуйской синеклизе в раннемеловое время приведены выше – в истории погружения пермских отложений.

В конце раннемелового времени глубинная зональность катагенетической юрских отложений была примерно следующей: ПК – 1200-2200 м, МК₁ – 2200-3000 м, МК₂ – 3000-3600 м, на глубинах до 4000 м – МК₃, [1].

Преобладающая часть юрских отложений Вилуйской синеклизы, находились в зоне механического уплотнения – Кп – 25-30 % на глубинах до 2 км и 15-25 на глубинах 2-3 км (рис. 6). Только 4,7 % осадков в нижней части разреза опустилось в зону растворения песчаников с погруженностью 10 % и менее.

На окончание раннемеловой седиментации на подстадии ПК находилось почти треть осадков сунтарской свиты (3645 км³ – 31 %), на стадиях МК₁+МК₂ находилась четверть осадков сунтарской свиты (3007 км³ – 25,6 %). В МК₃ – 600 км³ (5,1 %). На глубины более 4 км и более опустилось 562 км³ (4,7 %) отложений сунтарской свиты. Остальная треть (3949 км³ – 33,6 %) не достигла глубины 1200 м.

Ретроспективные реконструкции динамики погружения сунтарской свиты на конец раннемелового времени¹ (рис. 7) позволили определить объемы сунтарской свиты, испытавших термобарические условия стадий катагенеза от МК₁ до МК₃:

ПК₁ (1200-2200 м) – 3645 км³

МК₁ (2200-3000 м) – 2184 км³

МК₂ (3000-3600 м) – 823 км³

МК₃ (3600-4000 м) – 600 км³

Нижнеюрские отложения (сунтарская свита). Позднемеловое время

Время завершения замыкания Верхоянья с образованием горных сооружений. Образования маастрихтского возраста (линденская свита), завершающие мезозойский цикл осадконакопления, выделяются в каолинит-кварцевую формацию и сложены отложениями, напоминающими кору выветривания. Это свидетельствует о наступлении режима тектонической стабилизации в центральной части синеклизы в позднемеловое время. Современная максимальная мощность верхнемеловых отложений составляет порядка 1,25 км (Линденская впадина). С учетом эрозионного сноса в 0,5-1,0 установленного в результате изучения отражательной способности витринита [15] для территории Вилуйской синеклизы на конец мелового времени толщины увеличиваем до 1,75-2,25 км.

В конце мелового времени глубинную зональность катагенетической юрских отложений остается на уровнях: ПК – 1200-2200 м, МК₁ – 2200-3000 м, МК₂ – 3000-3600 м, на глубинах до 4000 м – МК₃ [1].

На окончание меловой седиментации на подстадии ПК находилось пятая часть осадков сунтарской свиты (2528 км³ – 21,4 %), почти треть на стадиях МК₁+МК₂ (3524 км³ – 30 %). В МК₃ – 600 км³ (5,4 %). На глубины 4 км и более опустилось 1385 км³ (11,7 %) отложений сунтарской свиты. Остальная треть (3726 км³ – 31,5 %) не достигла глубины 1200 м. Кп сохраняются все еще достаточно высокими – на глубинах до 3,5 км – Кп 15-20 % (рис. 6).

¹ Подошву сунтарской свиты построили путем добавления толщин кызылсырской свиты (аналогов) на палеографической карте по подошве юрских отложений на конец нижнего мела. Для кровли путем добавления толщин кызылсырской и сунтарской свит

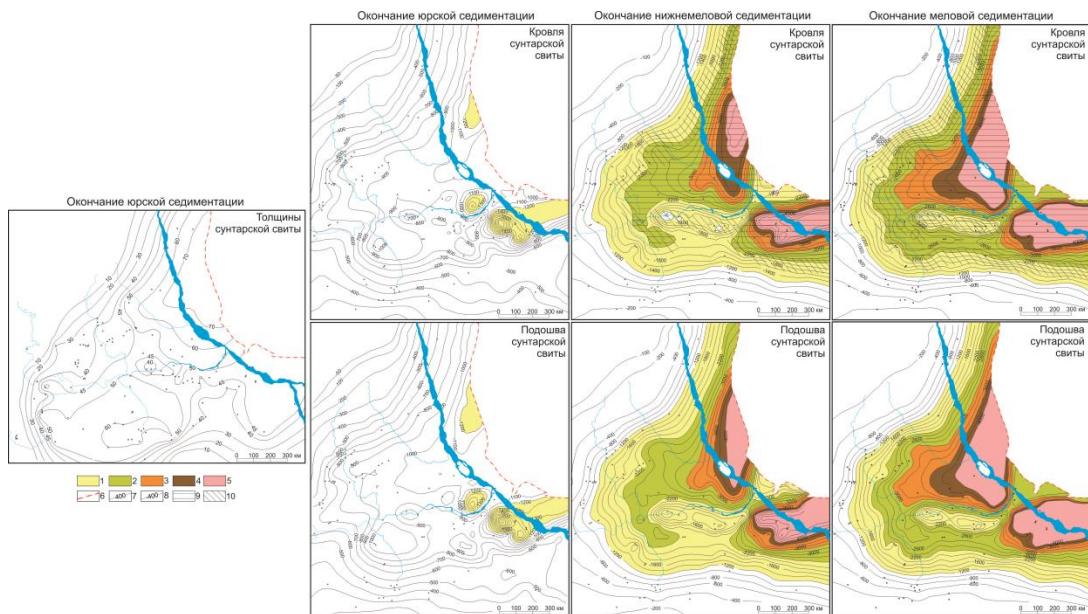


Рис.7. Динамика изменения структурных планов подошвы и кровли сунтарской свиты нижней юры в позднемезозойское время с приведением катагенетических уровней ее преобразованности.

Условные обозначения: 1 – ПК, 2 – МК₁, 3 – МК₂, 4 – МК₃, 5 – зона растворения песчаников, 6 – современная граница складчатой области, 7 – изолинии равных толщин и их величина, 8 – изолинии глубин залегания, 9 – главная зона нефтеобразования, 10 – потенциальные зоны нефтенакопления.

Fig 7. Dynamics of changes in the structural plans of the bottom and roof of the Suntar formation of the Lower Jurassic in the Upper Paleozoic-Mesozoic time with the catagenetic levels of their transformation.

Symbols: 1 – PC, 2 – MC₁, 3 – MC₂, 4 – MC₃, 5 – the sandstone dissolution zone, 6 – the modern boundary of the folded area, 7 – isolines of equal thickness and their size, 8 – depth isolines, 9 – the main oil formation zone, 10 – potential oil accumulation zones.

Таким образом, в течение, как минимум, почти 100 млн. лет большая половина объема сунтарской свиты Вилюйской синеклизы находилась в термобарических условиях генерации жидких УВ.

Ретроспективные реконструкции динамики погружения сунтарской свиты на конец мелового времени (рис. 7) позволили определить объемы сунтарской свиты, испытавших термобарические условия стадий катагенеза от МК₁ до МК₃:

ПК₁ (1200-2200 м) – 2528 км³

МК₁ (2200-3000 м) – 2351 км³

МК₂ (3000-3600 м) – 1173 км³

МК₃ (3600-4000 м) – 640 км³

Расчет количества объемов генерации битумоидов

Для расчёта коэффициентов эмиграции нефти и объёмной плотности массы, эмигрировавших битумоидов (микронефти) из материнских пород пермских и нижнеюрских отложений, были использованы данные геохимических исследований (табл. 1). Коэффициенты эмиграции нефти рассчитаны по уравнениям материального баланса [16; 17]; а плотности массы эмигрировавших битумоидов по уравнению [13]

Таблица 1

Коэффициенты нефтеотдачи и объёмная плотность массы эмигрировавших битумоидов из материнских пород верхнепалеозойско-мезозойских отложений, кг/м³ породы

Table 1

Oil recovery coefficients and the volume mass density of migrated bitumoids from source rocks of the upper paleozoic-mesozoic sediments, kg/m³ of rock

| Возраст | Глубина, м | Стадия катагенеза | Коэффициент отдачи микронефти | Q _{ЭМ} , кг/м ³ |
|----------------|------------|---------------------|-------------------------------|-------------------------------------|
| J ₁ | 1000-2380 | МК ₁ (Д) | 0,55 | 0,69 |
| | 2380-3000 | МК ₂ (Г) | 0,64 | 0,77 |
| P | 2747- 3238 | МК ₁ (Д) | 0,49 | 0,23 |
| | 2835- 3350 | МК ₂ (Г) | 0,73 | 0,63 |
| | 3370- 3546 | МК ₃ (Ж) | 0,79 | 0,72 |

Исходя из полученных объемов пород в различных градациях катагенеза и объемной плотности массы эмигрировавших битумоидов рассчитаны количества эмигрировавших битумоидов по пермским и юрским отложениям (таблицы 2 и 3). Изученность (вскрытость) пермских отложений не позволяет выделить отдельные нефтематеринские толщи. Поэтому к условно нефтематеринским отнесли все отложения кроме песчаников и близких к песчаникам разностям пород по разрезу скважины № 27, пробуренной в центральной части Средневилюйского месторождения.

Таблица 2

Объемы эмиграции битумоидов из пермских отложений

Table 2

Volumes of bitumoid generation from the permian deposits

| | Объем отложений по Градациям катагенеза | Q _{ЭМ} , кг/м ³ | Количество эмигрировавших битумоидов, млн. тонн |
|---|--|--|---|
| Пермские отложения в конце перми | ПК ₁ (1200-2200 м) – 60324 км ³ МК ₁ (2200-3000 м) – 29639 км ³ МК ₂ (3000-3600 м) – 7768 км ³ МК ₃ (3600-4000 м) – 1365 км ³ | МК ₁ – 0,23 МК ₂ – 0,63 МК ₃ – 0,72 | 6816,97 4893,84 982,8 |
| Пермские отложения в конце триаса | ПК ₁ (1200-2200 м) – 86757 км ³ МК ₁ (2200-3000 м) – 54992 км ³ МК ₂ (3000-3600 м) – 30182 км ³ МК ₃ (3600-4000 м) – 16286 км ³ | МК ₁ – 0,23 МК ₂ – 0,63 МК ₃ – 0,72 | 12648,16 19014,66 11725,92 |
| Пермские отложения в конце юры | ПК ₁ (1200-2200 м) – 29786 км ³ МК ₁ (2200-3000 м) – 54730 км ³ МК ₂ (3000-3600 м) – 47285 км ³ МК ₃ (3600-4000 м) – 26434 км ³ | МК ₁ – 0,23 МК ₂ – 0,63 МК ₃ – 0,72 | 12648,16 29789,55 19032,48 |
| Пермские отложения на современном этапе | ПК ₁ (1200-2200 м) – 10769 км ³ МК ₁ (2200-3000 м) – 15804 км ³ МК ₂ (3000-3600 м) – 20286 км ³ МК ₃ (3600-4000 м) – 16628 км ³ | МК ₁ – 0,23 МК ₂ – 0,63 МК ₃ – 0,72 | 3634,92 12780,18 11972,16 |
| ИТОГО | | | 145939,8 |
| С учетом песчанистости 0,35* | | | 94860,87 |

*Песчанистость установлена по разрезу скв. № 27 Средневилюйской площади.

Таблица 3

Объемы эмиграции битумоидов из юрских (сунтарская свита) отложений

Table 3

Volumes of bitumoid generation from the jurassic (suntar formation) sediments

| | Объем отложений по Градациям катагенеза | Q_{DM} , кг/м ³ | Количество эмигрировавших битумоидов, млн. тонн |
|---|---|--|--|
| Юрские отложения в конце юры | ПК ₁ (1200-2200 м) – 544,7 км ³ МК ₁ (2200-3000 м) – 0 км ³ МК ₂ (3000-3600 м) – 0 км ³ МК ₃ (3600-4000 м) – 0 км ³ | МК ₁ – 0,69 МК ₂ – 0,77 | 0 0 |
| Юрские отложения в конце раннего мела | ПК ₁ (1200-2200 м) – 3645 км ³ МК ₁ (2200-3000 м) – 2184 км ³ МК ₂ (3000-3600 м) – 823 км ³ МК ₃ (3600-4000 м) – 600 км ³ | МК ₁ – 0,69 МК ₂ – 0,77 | 1506,96 633,71 |
| Юрские отложения в конце мела | ПК ₁ (1200-2200 м) – 2528 км ³ МК ₁ (2200-3000 м) – 2351 км ³ МК ₂ (3000-3600 м) – 1173 км ³ МК ₃ (3600-4000 м) – 640 км ³ | МК ₁ – 0,69 МК ₂ – 0,77 | 1622,19 903,21 |
| ИТОГО | | | 4666,07 |

Таким образом, суммарно пермский и юрский нефтегазоматеринские породы сгенерировали порядка 100 млрд. тонн битумоидов. Существует много вариантов оценки коэффициента аккумуляции. По А.Э Конторовичу для Западно-Сибирской провинции он для нефти варьирует от 1,2 до 9,9 % [13], по С.Г.Неручеву составляет 7-10 % [18], по И.В. и В.И. Высоцким достигает даже 95 % [19]. Если коэффициент аккумуляции принять на уровне 10 %, то суммарно на территории Виллюйской синеклизы можно обнаружить месторождения с суммарными запасами до 10 млрд. тонн условных углеводородов (УВ).

Перспективы нефтегазоносности

На основе полученных данных уточнена карта перспектив нефтегазоносности Центральных районов Республики Саха (Якутия), построенная под научным руководством В.С. Ситникова (рис. 8).

Существенный прирост ресурсов газа прогнозируется на северо-западном борту Виллюйской синеклизы. Во-первых, в непосредственной близости находится обширная Линденская впадина, где максимально реализован генерационный потенциал пермских отложений. Во-вторых, месторождения Логлорского вала (Среднетунгское и Андыхлахское) заполнены углеводородами под замок, что свидетельствует о наличии возможности для дальнейшей миграции УВ в сторону северо-западного борта синеклизы.

На южном борту перспективы газоносности пермо-триасовых отложений представляются относительно скромными. Во-первых, потенциал Тангнарынского прогиба несопоставимо меньше потенциала Линденской впадины. Во-вторых, месторождения Хапчагайского мегавала не заполнены под замок, что может показывать ограниченность газовых ресурсов или их сильное рассеивание в пределах мегавала. В том и в другом случае, потенциал южного борта по пермо-триасовым отложениям будет складываться нефтегазоматеринским потенциалом небольшого по размерам Тангнарынского прогиба и частью Лунхино-Келинской впадины.

В то же время на юго-восточной части Виллюйской синеклизы в зоне сочленения с Якутским сводом перспективы нефтегазоносности могут быть весьма высокими за счет дополнительной реализации потенциала нижнеюрских нефтегазоматеринских пород. В пределах Лунхино-Келинской впадины нижнеюрские отложения полностью погружаются в главную зону нефтегенерации.

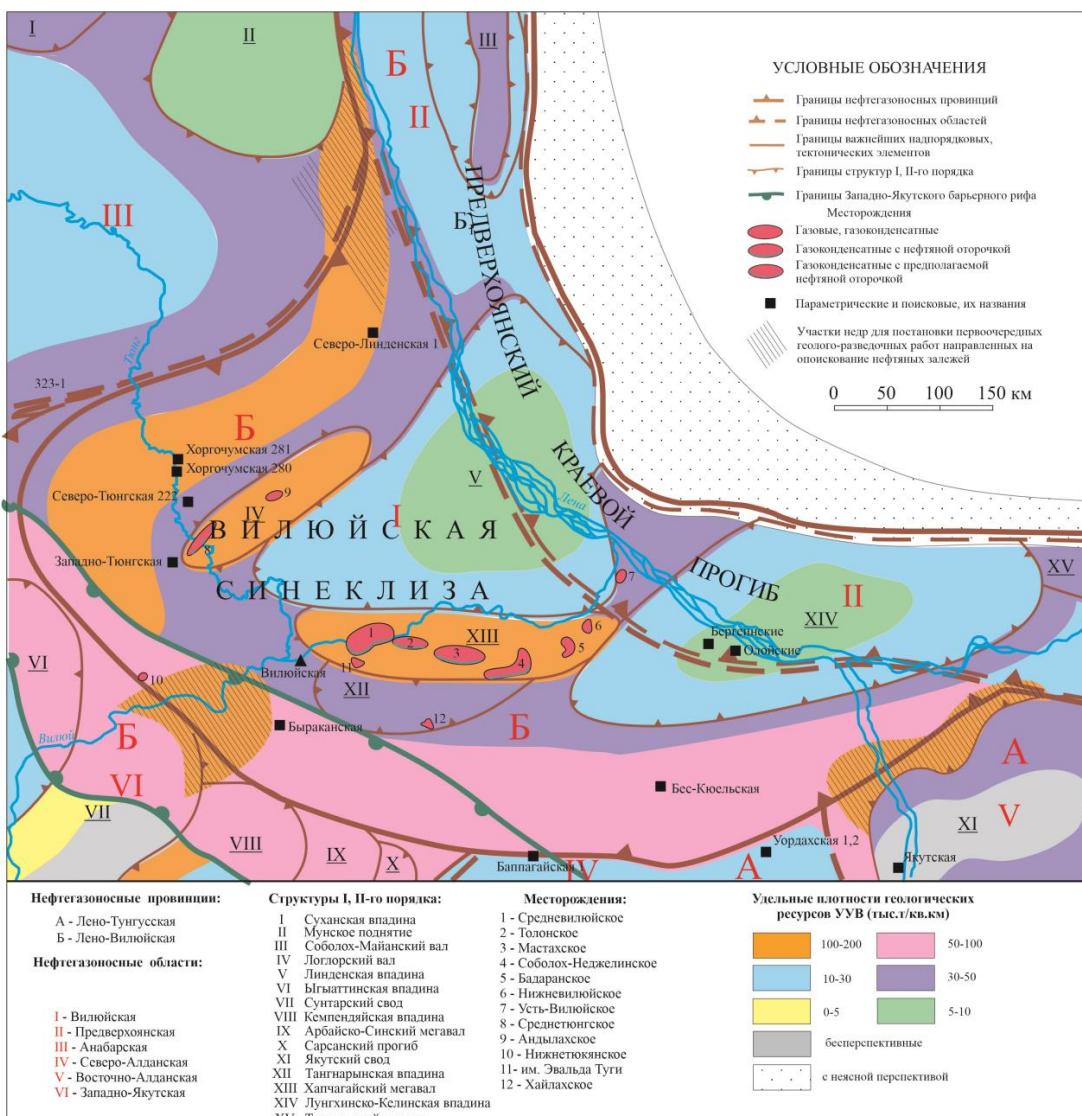


Рис. 8. Карта перспектив нефтегазоносности Центральных районов Республики Саха (Якутия) с уточнениями авторов

Fig. 8 Map of the oil and gas potential of the Central regions of the Sakha Republic (Yakutia) with author's comments

Вместе с тем в бортовых зонах повсеместно наблюдается неблагоприятная ситуация по взаимозалеганию пермо-триасового комплекса отложений. В частности, неджелинская и мономская региональные глинистые свиты нижнего триаса выклиниваются не перекрывая пермские отложения, которые являются основными нефтегазоматеринскими на территории Вилюйской синеклизы. В этих условиях формирование ловушек возможно в двух случаях (рис.9):

- 1) в зонах выклинивания пермских и триасовых пород может быть обеспечено перекрытием их отложениями сунтарской свиты нижней юры (рис. 9а). Здесь существует проблема возможного опесчанивания разреза сунтарской свиты по бортовым частям синеклизы;
- 2) При выраженном проявлении предтриасового перерыва возможны угловые несогласия представленные взаимозалеганием части проницаемых пермских пластов перекрытых глинистыми отложениями триаса (рис. 9б). Во втором случае наличие юрских глинистых отложений необязательно.

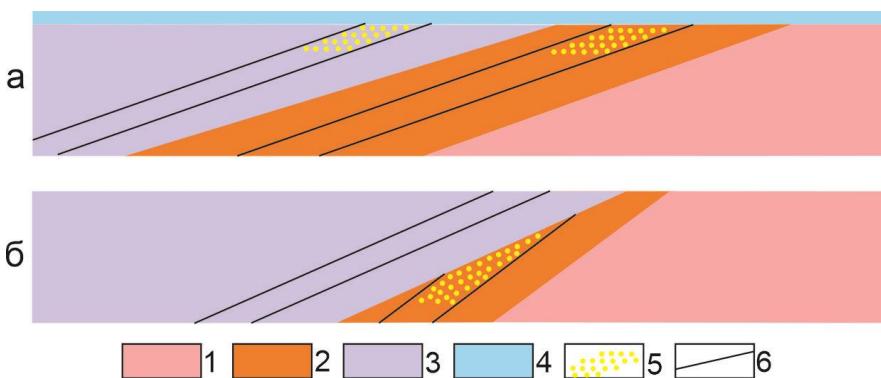


Рис. 9. Принципиальные схемы образования ловушек на северо-западном борту Вилюйской синеклизы:
а) при экранировании юрскими отложениями, б) при угловом несогласии.

Условные обозначения: 1 – допермские отложения, 2 – пермские отложения, 3 – триасовые отложения, 4 – юрские отложения, 5 – потенциальные залежи, 6 – границы проницаемого пласта.

Fig. 9. Schematic diagrams of trap formation on the north-western side of the Vilyui synclinorium:
a) when shielded by the Jurassic sediments, b) in case of angular unconformity.

Symbols: 1 – pre-Permian deposits, 2 – Permian deposits, 3 – Triassic deposits, 4 – Jurassic deposits, 5 – potential deposits, 6 – boundaries of a permeable bed.

Как показывает статистический анализ [20], нефтяные месторождения тяготеют к унаследованным структурам, в то время как новообразованные структурные формы обычно газоносны, что подтверждается на примере газовых и газоконденсатных месторождений Вилюйской синеклизы. Современный этап развития Вилюйского рифтогенного осадочного бассейна позволяет относить преобладающую часть газоносных структурных элементов рассматривать как новообразующиеся.

Таким образом, перспективы нефтеносности изучаемой территории связываются с унаследованным структурными элементами (Сунтарский свод, Якутское поднятие и Мунский свод) (рис. 8).

Сунтарский свод

На юго-западной части синеклизы большой интерес вызывает –северо-восточный склон Сунтарского свода. Здесь перспективными могут быть литолого-тектонические ловушки в зонах выклинивания пермо-триасовых, среднепалеозойских и венд-кембрийских отложений. Северо-восточный склон свода со стороны прилегающего борта синеклизы, с общегеологических позиций, остается перспективным объектом для поисков нефти и газа. Открытие Нижне-Тюкянского месторождения свидетельствует, что потенциал данной территории еще недостаточно изучен, а установленная газоносность разреза и наличие признаков нефтеносности (пленки нефти) в пределах Быраканского выступа подтверждает существующую латеральную направленность миграционного потока УВ и теоретическую возможность установления и локализации зон наиболее вероятного скопления [21].

Якутский свод

Якутский свод как обособленная структура, поднятие сформировалось в среднем палеозое, когда в результате контрастных положительных движений в отдельных блоках были эродированы ранее сформировавшиеся осадки, вплоть до пород фундамента. Занимая приподнятое структурное положение (от среднего палеозоя до начала мезозоя), этот жесткий блок фундамента в дальнейшем предопределил коленообразный изгиб будущей Верхоянской складчатой зоны. Севернее от Якутского свода расположена крупная Лунхино-Келинская впадина, где также как и в Линденской впадине максимально реализован генерационный потенциал пермских отложений.

В качестве перспективных можно выделить следующие комплексы отложений в пределах северо-западного и северного склонов Якутского поднятия (рис. 8): венд-кембрийский, пермо-триасовый, и верхнеюрско-нижнемеловой. С общегеологической точки зрения на рассматриваемой территории имеются все факторы, определяющие перспективы нефтегазоносности: наличие известных нефтегазоносных комплексов, наличие нефтематеринских отложений, благоприятное сочетание проницаемых и экранирующих толщ, высокая вероятность обнаружения структурных и литологических ловушек, и последнее, зафиксированные прямые признаки нефтегазоносности, в виде присутствия свободного газа по данным испытания скважин. Более подробно в работе [22].

Мунский свод

В северной части территории, прилегающей к Мунскому своду, в пределах северо-западного борта Вилуйской синеклизы по результатам бурения Бахынайской опорной скважины установлена высокая газонасыщенность вод ниже- среднеюрских отложений. Дебиты воды достигали до $85,2 \text{ м}^3/\text{сут}$ при динамическом уровне 117 м. Гидрологические исследования в этой скважине проводились ВНИГРИ, на их основе намечена зона возможного газонакопления в нижне-юрских отложениях [23]. Кроме того, на юго-западном склоне Мунского свода на небольшой глубине установлено Верхнемунское битумное поле. Как указывает Каширцев В.А. [24], по набору и распределению биомаркеров, эти битумы обязаны своим происхождением нефтям, образованным за счет преимущественно сапропелевого органического вещества юрских морских материнских отложений. Другими словами, инструментально подтверждается существование отдельного юрского очага нефтегазообразования в пределах Вилуйской синеклизы.

Высокими перспективами здесь также обладают пермские отложения, благодаря сочетанию надежной нижнетриасовой покрышки и плотных подстилающих карбонатных пород кембрия, способных запечатать проницаемые пермские коллектора вверх по восстанию в направлении Мунского свода.

Кембрийские отложения также могут представлять интерес. Так, в Северо-Линденской параметрической скважине был отобран керн с маслянистыми пятнами с интервала залегания куонамской формации. Также в колонковой скважине № 65 пробуренной на юго-восточном склоне Мунского поднятия, из интервала глубин 544-684 м представляющего кембрийские отложения, был отобран керн, интенсивно насыщенный капельной нефтью.

Заключение

Проведенными исследованиями показан сохраняющийся существенный потенциал перспектив нефтегазоносности пермо-триасового и юрского комплексов отложений.

С учетом того, что практически все поисковые работы в пределах Вилуйской синеклизы были нацелены на поиски антиклинальных структур (кроме 4-х скважин на Хоргочумской площади), выделенный потенциал может быть сосредоточен на неантиклинальных ловушках.

Открытие новых месторождений нефти и газа, а также наращивание имеющейся углеводородной базы Вилуйской синеклизы в значительной мере зависит от точности представлений о ее геологическом строении ее бортовых частей. Все это предполагает необходимость дальнейшего изучения территории с помощью комплексирования геолого-геохимических и геофизических методов, а также бурения глубоких скважин.

Литература

- Сафонов А.Ф. Историко-генетический анализ процессов нефтегазообразования (на примере востока Сибирской платформы). Якутск: Издательство ЯНЦ СО РАН; 1992:145.
- Черненко, В.Б. Особенности геологического строения и перспективы нефтеносности Соболох-Неджелинского газоконденсатного месторождения / В.Б. Черненко, А.И. Сивцев, В.С. Ситников // Наука и образование. 2013;4(72): 24-32.

3. Сафонов А.Ф. Нефтегазоносность востока Сибирской платформы: историко-генетический анализ, размещение месторождений нефти и газа. *Природные ресурсы Арктики и Субарктики*. 2014;19(3):63-69.
4. Сафонов, А. Ф. Нефтеносность нижнемезозойских отложений Хапчагайского мегавала Вилюйской синеклизы / А. Ф. Сафонов, А. И. Сивцев, В. Б. Черненко // *Геология и геофизика*. 2014;55(8):1263-1269. DOI 10.15372/GiG20140807.
5. Семенов В.П., Железняк М.Н. Особенности геотемпературного поля и залегания многолетнемерзлой толщи Вилюйской синеклизы // *Природные ресурсы Арктики и Субарктики*. 2018;4:45-54. DOI: <https://doi.org/10.31242/2618-9712-2018-26-4-45-54>.
6. Конторович А.Э., Неручев С.Г. Катагенез рассеянного органического вещества и нефтегазообразование // *Проблемы нефтеносности Сибири*. Новосибирск: Наука; 1971: 51-69.
7. Сафонов, А.Ф., Условия генерации углеводородов в верхнепалеозойских и мезозойских отложениях северо-восточной окраины Сибирской платформы / А.Ф. Сафонов, Е.И. Бодунов, В.А. Каширцев, А.Н. Изосимова // *Геология и геофизика*. 1979;1: 3-8.
8. Зуева, И.Н. Нефтегенерационный потенциал рассеянного органического вещества пермских отложений Вилюйского бассейна / И.Н. Зуева, О.Н. Чалая, А.Ф. Сафонов, А.И. Сивцев, Ю.С. Глязнецова, С.Х. Лифшиц // *Наука и образование*. 2017;2:17-21.
9. Зуева, И.Н. Характеристика рассеянного органического вещества и оценка нефтегенерационного потенциала верхнелейасовых отложений Вилюйской синеклизы/ И.Н. Зуева, О.Н. Чалая, А.Ф. Сафонов, В.А. Каширцев // *Наука и образование*. 2013;2:41-46.
10. Васильев, С.А. Нефтегазоносность Вилюйской синеклизы и перспективы поисков залежей углеводородов / С.А. Васильев, П.Н. Соболев, Е.С. Таффарель М.П. Голованова, И.И. Гарифуллин // *Геология, геофизика и разработка нефтяных и газовых месторождений*. 2018;12:14-26. DOI 10.30713/2413-5011-2018-12-14-26.
11. Делиу Е. А. Особенности геологического строения нижнеюрских отложений Вилюйской синеклизы // *Региональная геология и металлогения*. 2025;32(1):71-78. doi:10.52349/0869-7892_2025_101_71-78
12. Федорович М.О., Космачева А.Ю. Прогноз нефтегазоносности Вилюйской гемисинеклизы на базе интерпретации геолого-геофизических материалов и технологии бассейнового моделирования (Республика Саха (Якутия)). *Георесурсы*. 2023;25(1):81-94. <https://doi.org/10.18599/grs.2023.1.9>
13. Конторович А.Э. Геохимические методы количественного прогноза нефтегазоносности. М.: Недра; 1976:250.
14. Микуленко К.И., Ситников В.С., Тимиршин К.В., Булгакова М.Д. Эволюция структуры и условий нефтегазообразования осадочных бассейнов Якутии. Якутск: ЯНЦ СО РАН;1995:180.
15. Сюндюков И.Ш., Сивцев А.И. Использование катагенеза углей для палеотектонических реконструкций в Лено-Вилюйском нефтегазоносном бассейне //Дегазация земли: геотектоника, геодинамика, геофлюиды; нефть и газ; углеводороды и жизнь: сборник материалов Всероссийской конференции с международным участием к 100-летию со дня рождения академика П.Н. Кропоткина, 18-22 октября 2010 г., г. Москва. М.:ГЕОС;2010:542-545.
16. Неручев С.Г. Нефтепроизводящие свиты и миграция нефти. Л.: Недра;1969:240.
17. Неручев С.Г., Рогозина Е.А. Геохимические основы прогноза нефтегазоносности. СПб.: ВНИГРИ;2010:280.
18. Неручев С.Г., Баженова Т.К., Смирнов С.В., Андреева О.А., Климова Л.И. Оценка потенциальных ресурсов углеводородов на основе моделирования процессов их генерации, миграции и аккумуляции. СПб: Недра;2006:364
19. Высоцкий И.В., Высоцкий В.И. Формирование нефтяных, газовых и конденсатногазовых месторождений. М.: Недра;1986:228.
20. Анализ влияния различных факторов на размещение и формирование месторождений нефти и газа (на примере платформенных областей) / Под ред. В.С. Лазарева и В.Д. Наливкина. Л.: Недра;1971:336
21. Сивцев А.И. Перспективы нефтегазоносности северо-восточного склона Сунтарского поднятия // Геология и минерально-сырьевые ресурсы Северо-Востока России. Материалы IX Всероссийской научно-практической конференции: в 2-х томах. 2019:260-263.
22. Калинин А.И., Сивцев А.И. Перспективы нефтегазоносности Северо-восточной части Алданской антеклизы // *Нефтяное хозяйство*. 2019;6:22-27.

23. Погодаев, А.В. Перспективы нефтегазоносности и приоритетные направления дальнейших поисковых работ в Вилюйской НГО (Сибирская платформа) / А.В. Погодаев, В.С. Ситников, И.В. Буйдылло // *Геология нефти и газа*. 2015;2:6-16.

24. Каширцев В.А. Органическая геохимия нефтидов востока Сибирской платформы. Якутск: ЯФ Изд-ва СО РАН;2003:160.

References

1. Safronov A.F. *Historical and genetic analysis of oil and gas formation processes (based on the east of the Siberian platform)*. Yakutsk: Publishing House of the Yakutsk Scientific Center of the Siberian Branch of the Russian Academy of Sciences; 1992:145 (in Russian).
2. Safronov A.F. Oil and gas potential of the eastern Siberian platform: Historical and genetic analysis, and distribution of oil and gas deposits. *Natural Resources of the Arctic and Subarctic*. 2014;19(3):63–69 (in Russian).
3. Chernenko V.B. Features of the geological structure and prospects of oil content of the Sobolokh-Nejelinskoye gas condensate field. *Science and Education*. 2013;4(72): 24–32 (in Russian).
4. Safronov A.F., Sivtsev A.I., Chernenko V.B. Oil potential of the Lower Mesozoic deposits of the Khapschagai megawall of the Vilyui. *Geology and Geophysics*. 2014;55(8):1263–1269 (in Russian). DOI 10.15372/GiG20140807.
5. Semenov V.P., Zheleznyak M.N. Features of geotemperature field and occurrence of permafrost section of Vilyui syncline. *Natural Resources of the Arctic and Subarctic*. 2018;4:45–54 (in Russian). DOI: <https://doi.org/10.31242/2618-9712-2018-26-4-45-54>.
6. Kontorovich A.E., Neruchev S.G. Catagenesis of dispersed organic matter and oil and gas formation. *Problems of Siberia's Oil Potential*. Novosibirsk: Nauka; 1971:51–69 (in Russian).
7. Safronov A.F., Bodunov E.I., Kashirtsev V.A., Izosimova A.N. Conditions of hydrocarbon generation in Upper Paleozoic and Mesozoic deposits of the Northeastern margin of the Siberian platform. *Geology and Geophysics*. 1979;1:3–8 (in Russian).
8. Zueva I.N. Chalaya O.N., Safronov A.F., et al. Oil generation potential of the scattered organic matter in the Permian deposits of the Vilyui basin. *Science and Education*. 2017;2:17–21 (in Russian).
9. Zueva I.N., Chalaya O.N., Safronov A.F., et al. Characteristics of dispersed organic matter and assessment of the oil-generating potential of the Upper Leysasian deposits of the Vilyui syncline. *Science and Education*. 2013;2:41–46 (in Russian).
10. Vasilyev S.A., Sobolev P.N., Taffarel E.S., et al. Oil and gas potential of the Vilyui Syncline and prospects for searching for hydrocarbon deposits. *Geology, Geophysics, and Development of Oil and Gas Fields*. 2018;12:14–26 (in Russian). DOI 10.30713/2413-5011-2018-12-14-26.
11. Deliu E. A. Features of the geological structure of the lower jurassic deposits of the Vilyui Sinclise. *Regional Geology and Metallogeny*. 2025;32(1):71–78 (in Russian) doi:10.52349/0869-7892_2025_101_71-78
12. Fedorovich M.O., Kosmacheva A.Yu. Prediction of oil and gas occurrence in the Vilyui hemisyncline according to interpretation of geological and geophysical data and basin modeling (Sakha Republic (Yakutia)). *Georesursy = Georesources*. 2023;25(1):81–94 (in Russian). <https://doi.org/10.18599/grs.2023.1.9>
13. Kontorovich A.E. *Geochemical methods of quantitative prediction of oil and gas potential*. Moscow: Nedra; 1976:250 (in Russian).
14. Mikulenko K.I., Sitnikov V.S., Timirshin K.V., Bulgakova M.D. Evolution of the structure and conditions of oil and gas formation in the sedimentary basins of Yakutia. Yakutsk: YSC SB RAS;1995:180 (in Russian).
15. Syundyukov I.Sh., Sivtsev A.I. The use of coal catagenesis for paleotectonic reconstructions in the Lena-Vilyui oil and gas basin. In: *Degassing of the Earth: geotectonics, geodynamics, geofluids; oil and gas; hydrocarbons and life: proceedings of the All-Russian Conference with international participation dedicated to the 100th anniversary of the birth of Academician P.N. Kropotkin*, October 18–22, 2010, Moscow. Moscow: GEOS; 2010:542–545 (in Russian).
16. Neruchev S.G. *Oil-producing series and oil migration*. Leningrad: Nedra; 1969:240 (in Russian).
17. Neruchev S.G., Rogozina E.A. Geochemical foundations of oil and gas prospecting. St. Petersburg: VNIGRI; 2010:280 (in Russian).
18. Neruchev S.G., Bazhenova T.K., Smirnov S.V., et al. *Assessment of potential hydrocarbon resources based on modeling of their generation, migration, and accumulation processes*. St. Petersburg: Nedra; 2006:364 (in Russian).

19. Vysotsky I.V., Vysotsky V.I. *Formation of oil, gas, and condensate-gas deposits*. Moscow: Nedra; 1986:228 (in Russian).
20. Lazarev V.S., Nalivkin V.D. (eds.). *An analysis of the influence of various factors on the location and formation of oil and gas deposits (based on the example of platform regions)*. Leningrad: Nedra; 1971:336 (in Russian).
21. Sivtsev A.I. Prospects for oil and gas potential of the northeastern slope of the Suntarsky uplift. In: *Geology and mineral resources of the North-East of Russia: Proceedings of the IX All-Russian scientific and practical conference: in 2 volumes*. 2019:260–263 (in Russian).
22. Kalinin A.I., Sivtsev A.I. Prospects for oil and gas potential in the north-eastern part of the aldan antecline. *Oil Industry*. 2019;6:22–27 (in Russian).
23. Pogodaev A.V., Sitnikov V.S., Buydillo I.V. Prospects for oil and gas potential and priority areas for further exploration in the Vilyui oil and gas field (Siberian Platform). *Geology of Oil and Gas*. 2015;2:6–16 (in Russian).
24. Kashirtsev V.A. *Organic geochemistry of naftids in the east of the Siberian platform*. Yakutsk: YaF Publishing House of the SB RAS; 2003:160 (in Russian).

Сведения об авторах

КАЛИНИН Александр Иосифович – н. с., ИПНГ СО РАН. ORCID: 0000-0002-5713-7935

е-mail: alexklnn@mail.ru

СИВЦЕВ Алексей Иванович – к.г.-м.н, доц. кафедры «Недропользование», СВФУ им. М.К. Аммосова, <https://orcid.org/0000-0001-8386-2383>, ResearcherID: F-1077-2014, Scopus Author ID: 56287496100, SPIN: 8676-4888

е-mail: maraday@yandex

About the authors

Alexander I. KALININ – Researcher, Institute of Oil and Gas Problems SB RAS, Yakutsk, Russian Federation, ORCID: 0000-0002-5713-7935

е-mail: alexklnn@mail.ru

Aleksei I. SIVTSEV – Cand. Sci. (Geology and Mineralogy), Docent, M. K. Ammosov North-Eastern Federal University, Yakutsk, Russian Federation, ORCID: 0000-0001-8386-2383, ResearcherID: F-1077-2014, Scopus Author ID: 56287496100, SPIN: 8676-4888

е-mail: maraday@yandex.ru

Вклад авторов

Калинин А.И. – сбор и верификация данных, написание текста, ресурсное обеспечение

Сивцов А.И. – разработка концепции, написание текста, редактирование.

Authors' contribution

Alexander I. Kalinin – data collection and verification, writing of the text, resource provision

Aleksei I. Sivtsev – development of the concept, writing of the text, editing.

Конфликт интересов

Авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов. Корреспондент автор имеет право и полномочия выступать от имени всех авторов по этому исследованию

Conflict of interests

The authors declare that there is no conflict of interest. Corresponding author has the right and authority to speak on behalf of all authors on this study

Поступила в редакцию / Submitted 07.10.2025

Поступила после рецензирования / Revised 12.11.2025

Принята к публикации / Accepted 24.12.2025

СОВРЕМЕННЫЕ СРЕДСТВА АНАЛИЗА ДАННЫХ АЗИМУТАЛЬНОГО МАГНИТОТЕЛЛУРИЧЕСКОГО МОНИТОРИНГА НА БИШКЕКСКОМ ГЕОДИНАМИЧЕСКОМ ПОЛИГОНЕ

К. С. Непеина, Е. А. Баталева*

Научная станция РАН в г. Бишкеке,

г. Бишкек, Кыргызстан

*nepaina.k@mail.ru

Аннотация

В работе представлена методика обработки данных магнитотеллурического (МТ) мониторинга, принятая с 2010 г. в Научной станции РАН в г. Бишкеке (НС РАН). Отличие предлагаемой методики от стандартной заключается в оценке импедансных соотношений после амплитудно-фазовой коррекции внутри часовых файлов магнитотеллурического зондирования, полученных из непрерывной необработанной записи. Современные дополнения, надстройки и создание дополнительных программ позволили адаптировать и автоматизировать получение частотно-временных рядов (ЧВР) МТ данных в виде относительных вариаций различных расчетных электромагнитных параметров как цветных псевдоразрезов, а также добавление комплементарной входной информации для дополнительного анализа происходящих геодинамических событий. Эти усовершенствования взяты в практику оптимизации обработки данных МТ мониторинга стационарных и режимных станций сети НС РАН. Зарегистрированы права на программу MTDataVar. Показаны примеры результатов адаптации предлагаемой методики. Использование запатентованных ООО «Северо-Запад» программных комплексов MT-Corrector и EPI-KIT позволило автоматизировать получение импедансных и фазовых соотношений для пост-обработки ЧВР. Интеграция данных о приливных воздействиях, эндогенном электромагнитном поле и сейсмической активности обеспечивает сопоставление динамики геофизических параметров и напряженно-деформированного состояния среды. На примере землетрясений и контролируемых взрывов показана высокая чувствительность метода к изменениям в литосфере и анизотропии проводимости. Разработанный инструментарий способствует выявлению тензочувствительных зон, регистрации пространственно-временных аномалий и прогнозированию активизации разломных структур. Полученные результаты подтверждают эффективность предложенного подхода для комплексного мониторинга геодинамических процессов в тектонически активных регионах. Предложены направления дальнейшего развития средств обработки и анализа МТ данных.

Ключевые слова: естественное электромагнитное поле, магнитотеллурический мониторинг, азимутальная анизотропия, вариации кажущегося электрического сопротивления, напряженно-деформированное состояние среды, электропроводность литосферы, импедансные соотношения, амплитудно-фазовая коррекция, частотно-временные ряды, псевдоразрезы, тензочувствительные зоны, лунно-солнечные приливы, электромагнитное поле эндогенного происхождения

Финансирование: Исследование выполнено по теме государственного задания НС РАН (номер Минобрнауки РФ 1021052806445-4-1.5.1)

Благодарности: Авторы благодарят ученого секретаря НС РАН О.Б. Забинякову за предоставленные материалы и рецензентов за комментарии

Для цитирования: Непеина К.С., Баталева Е.А. Современные средства анализа данных азимутального магнитотеллурического мониторинга на Бишкекском геодинамическом полигоне. *Вестник СВФУ*. 2025;(4): 44-56. DOI: 10.25587/2587-8751-2025-1-44-56

MODERN TOOLS OF ANALYZING AZIMUTHAL MAGNETOTELLURIC MONITORING DATA AT THE BISHKEK GEODYNAMIC POLYGON TEST SITE

Kseniia S. Nepeina, Elena A. Bataleva*

Research Station RAS in Bishkek,

Bishkek, Kyrgyzstan

*nepeina.k@mail.ru

Abstract

The paper presents a methodology for processing magnetotelluric (MT) monitoring data adopted since 2010 at the Bishkek Research Station of the Russian Academy of Sciences (RS RAS). The proposed methodology differs from the standard one as it evaluates impedance relationships after amplitude-phase correction within hourly files of MT sounding obtained from a continuous raw record from stationary and regime stations of the RS RAS network. Modern additions, add-ons, and the creation of additional programs made it possible to adapt and automate the receipt of time-frequency series (TFS) in the form of relative variations of various calculated electromagnetic parameters as color pseudo-sections, as well as adding complementary input information for additional analysis of ongoing geodynamic events. The usage of the patented MT-Corrector and EPI-KIT software packages, developed by Nord-West Ltd., made it possible to automate the acquisition of impedance and phase ratios for TFS post-processing. Integration of data on tidal effects, electromagnetic field characteristics of endogenous origin, and seismic activity ensures correlation between the dynamics of geophysical parameters and the stress-strain state of the medium. The developed toolkit facilitates the identification of stress-sensitive zones, registration of spatiotemporal anomalies, and forecasting of fault activation processes. The obtained results confirm the efficiency of the proposed approach for comprehensive monitoring of geodynamic processes by MT data in tectonically active regions.

Keywords: natural electromagnetic field, magnetotelluric monitoring, azimuthal anisotropy, apparent resistivity variations, stress and strain state of the medium, lithospheric conductivity, impedance relationships, amplitude-phase correction time-frequency series, pseudo-sections, stress-sensitive zones, lunar-solar tides, electromagnetic field of endogenous origin

Funding: The research is conducted under the Federal State assignment for RS RAS number of 1021052806445-4-1.5.1

Acknowledgements: Authors acknowledge Academic Secretary O.B. Zabinyakova for the provided materials and reviewers for their comments

For citation: Nepeina K.S., Bataleva E.A. Modern tools of analyzing azimuthal magnetotelluric monitoring data at the Bishkek Geodynamic Polygon Test Site. *Vestnik of North-Eastern Federal University. "Earth Sciences"*. 2025;(4): 44-56. DOI: 10.25587/2587-8751-2025-1-44-56

Введение

В работе [1] были рассмотрены две группы явлений, протекающих в геологической среде, которые формирующих динамические вариации свойств геоэлектрического разреза при изменении напряженно-деформированного состояния геосреды. Такой тип явлений обусловлен переменным состоянием естественного электромагнитного поля Земли. Во многом, это связано с анизотропией геологической среды. В нашем случае представляет интерес электрическая анизотропия горных пород – различие сопротивлений в зависимости от направления прохождения тока [2]. Успешные реализации мониторинга взаимосвязи характера изменения электромагнитных параметров и геодинамической активности получены: в горных регионах – для Алтая [3, 4], для Тянь-Шаня [5-12], для Карелии [13] и др. Такие исследования геодинамического состояния среды с помощью электромагнитных методов перспективны и на рудниках.

Использование данных профильных магнитотеллурических (МТ) зондирований по стандартной методике с помощью станций Phoenix MTU-5 (Canada) позволило изучить глубинное строение Центрального и Северного Тянь-Шаня и построить детальные геоэлектрические модели вдоль серии профилей, секущих основные тектонические структуры [14]. На основе полученного распределения геоэлектрических неоднородностей на территории Бишкекского геодинамического полигона (БГП) были выбраны тензочувствительные зоны и установлены стационарные (Аксу и Чон-Курчак) и режимные (Кентор С5, Укок-2 и др.) пункты МТ мониторинга НС РАН (рис. 1).



Рис. 1. Стационарные (Аксу и Чон-Курчак) и режимные (Кентор С5, Укок-2 и др.) пункты МТ мониторинга НС РАН на Северном Тянь-Шане (треугольники). Красными линиями показаны крупные разломы: ТФ – Таласо-Ферганский, ЦТ – Центрально-Терской, ИА – Иссык-Атинский [15]

Fig. 1. Stationary (Aksu and Chon-Kurchak) and regime (Kentor C5, Ukok-2) MT monitoring points in the Northern Tien Shan (triangles). Red lines show main faults: TF – Talas-Fergana, CT – Central Terskey, IA – Issyk-Ata [15]

Чувствительность электромагнитного поля к таким событиям, как землетрясения и взрывы, дает основания рассматривать его вариации как индикатор современных геодинамических процессов. Так, например, на всех 5 компонентах электромагнитного поля (E_x, E_y, H_x, H_y, H_z) на записях стационара Аксу было чётко зарегистрировано мощное ($M \sim 7$) Учтурфанское землетрясение 22.01.2024 (на удалении ~ 400 км) (рис. 2). Это доказывает существование электромагнитного отклика от землетрясений в условиях тензочувствительного пункта Аксу, что и отражается в вариациях наблюдаемых компонент. Характеристики данного события согласуются с результатами, полученными ранее при проведении геофизических исследований для изучения Камбаратинского взрыва [16].

Начало использования методики азимутального магнитотеллурического мониторинга было положено в 2010 г., при изучении контролируемого геодинамического события. На проектируемой Камбаратинской ГЭС был проведён промышленный взрыв мощностью 2,914 кт [17]. В его рамках реализован комплекс геофизических исследований, включавший сейсмологические, электромагнитные и GPS-наблюдения [16]. Электромагнитные измерения были направлены на выявление связи вариаций какущегося сопротивления с изменением напряжённо-деформированного состояния земной коры Тянь-Шаня [16-24]. Анализ данных показал, что направления максимальных и минимальных изменений электросопротивления совпадают с предполагаемыми осями сжатия и растяжения деформационного поля и сопровождаются перераспределением флюидов в порово-трещинной системе [16-18].

Изучению эффектов, возникающих при азимутальной анизотропии электропроводности, уделяют много внимания, приближаясь к решению прямых и обратных задач с разных сторон и рассматривая множество аспектов [25-31].

При этом стоит отметить, что стандартная методика обработки присутствует только на начальном этапе обработки без применения дальнейшей инверсии данных. Отличие заключается в дальнейшем разбиении непрерывной записи МТ наблюдений на почасовые отрезки в соответствии с предложенным ранее алгоритмом [18, 19]. Процесс выделения часовых интервалов в диапазоне периодов от 0.01 до 100 с реализуется в программе фирмы Phoenix SSMT2000 [32].

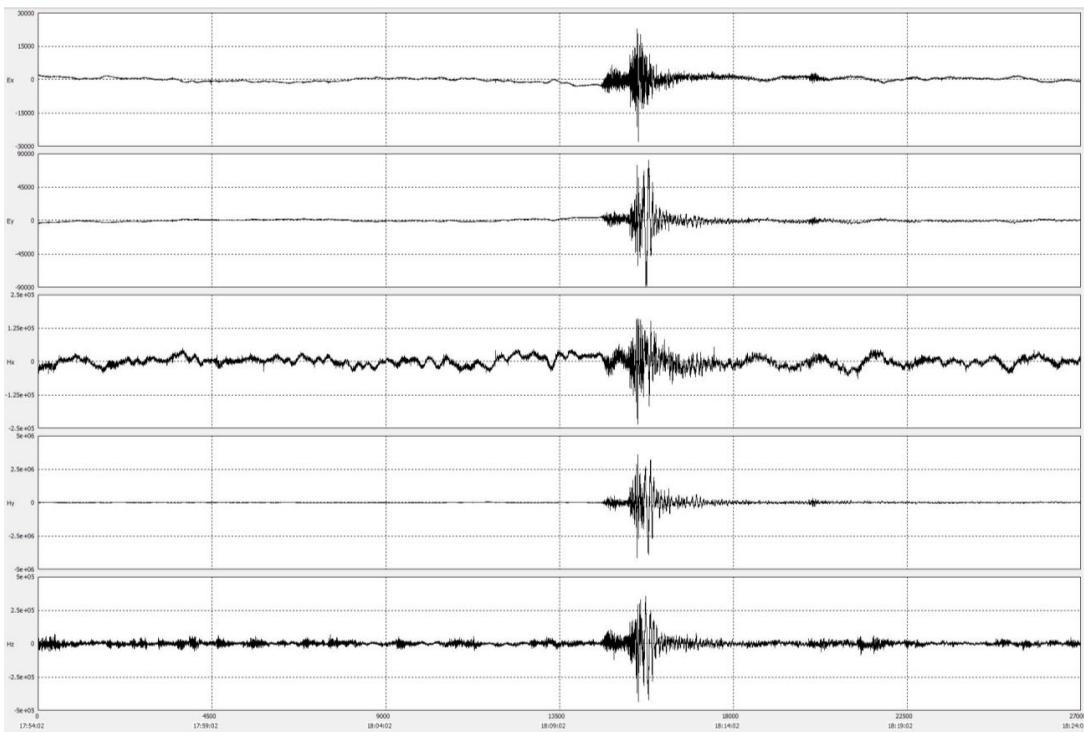


Рис. 2. Исходная запись Учтурфанского землетрясения 22.01.2024 по данным Phoenix MTU-5 на стационаре Аксу в окне программы EPI-KIT

Fig. 2. Raw recording of the Uqturpan earthquake on 22.01.2024 by Phoenix MTU-5 at the Aksu station in the EPI-KIT program window

Для просмотра и коррекции кривых зондирования используются такие программные продукты как SSMT2000, MT-Corrector и EPI-KIT [33] с получением *.edi-файлов [34]. Последующая обработка проводилась в отдельной созданной для этих целей программой GraphBuilder, на выходе которой получают *.xls-файл с указанием диапазона периодов зондирования, среднего значения и относительных вариаций электромагнитных параметров в различных азимутах для каждой часовой «сессии» [35].

Важным направлением развития и совершенствования методов анализа МТ-данных является автоматизация и оптимизация процесса построения итоговых псевдоразрезов вариаций различных вычисленных электромагнитных параметров. Дополнительно, интеграция вспомогательной информации, такой как динамика лунно-солнечных приливов, энергетические характеристики эндогенной составляющей электромагнитного поля и параметры сейсмической активности на территории БГП, позволяет проводить более точные сопоставления и интерпретации.

Материалы и методы исследования

Методика азимутального разворота основывается на классических уравнениях, полученных в [36]:

$$Z_{xx}^\alpha(T) = Z_{xx} \cos^2 \alpha + Z_{yy} \sin^2 \alpha + (Z_{xy} + Z_{yx}) \sin \alpha \cos \alpha, \quad (1)$$

$$Z_{xy}^\alpha(T) = Z_{xy} \cos^2 \alpha - Z_{yx} \sin^2 \alpha - (Z_{xx} - Z_{yy}) \sin \alpha \cos \alpha, \quad (2)$$

$$Z_{yx}^\alpha(T) = Z_{yx} \cos^2 \alpha - Z_{xy} \sin^2 \alpha - (Z_{xx} - Z_{yy}) \sin \alpha \cos \alpha, \quad (3)$$

$$Z_{yy}^\alpha(T) = Z_{yy} \cos^2 \alpha + Z_{xx} \sin^2 \alpha - (Z_{xy} + Z_{yx}) \sin \alpha \cos \alpha, \quad (4)$$

где $\mathbf{Z} = \mathbf{E}/\mathbf{H}$ – тензор магнитотеллурического импеданса; x, y, z – пространственные направления, α – азимут поворота системы, T – период зондирования, $0.01 \leq T \leq 100$ с.

При этом кажущееся сопротивление на каждом азимуте в зависимости от периода пересчитывается для каждой часовой реализации с шагом 15° по азимуту [18, 19]:

$$\rho_m^\alpha(T) = \frac{T |Z_m^\alpha(T)|^2}{2\pi\mu_0}, m = xx, xy, yx, yy, \quad (5)$$

где m – индекс импеданса в соответствующем направлении.

Численно эти параметры были получены в специально созданной вспомогательной программе GraphBuilder, где рассчитываются среднее значение параметра и его относительные вариации. Затем для визуального отображения этих относительных вариаций электромагнитных параметров, выстраиваются вручную оператором в программе Surfer (Golden Software, USA) при помощи выбора соответствующего диапазона в виде псевдоразрезов (цветных панелей), называемых частотно-временными рядами (ЧВР) [35]. Результат представляет собой цветной псевдоразрез относительных вариаций значений электромагнитных параметров. По вертикальной оси отложен логарифм периода зондирования идентичный понятию псевдоглубина, по горизонтальной оси – время наблюдений с дискретностью 1 час. Данный формат визуализации обеспечивает анализ напряжённо-деформированного состояния среды одновременно по четырём параметрам: азимуту, периоду зондирования (глубине), амплитуде вариаций электропроводности и времени.

На данный момент построение ЧВР автоматизировано в программе MTDataVar [37], разработанной в 2023 г. в ходе выполнения проекта РНФ № 22-27-00567 «Изучение внутреннего строения и динамики активных геологических разломов с использованием комплекса электромагнитных зондирований (на примере Северного Тянь-Шаня)». Результаты её работы были продемонстрированы на данных аудио-МТЗ (рис. 3). Здесь на вертикальной оси отложены периоды МТ зондирования (T), связанные напрямую с глубиной. Программа значительно упрощает ручной обработки файла Excel и ускоряет построение псевдоразрезов.

Развитие методики сопоставления результатов азимутального МТ-мониторинга связано с комплексным учётом энергетических характеристик электромагнитного поля эндогенного происхождения, вертикальной компоненты расчётных лунно-солнечных приливов и параметров сейсмических событий [35; 38]. Предполагается, что источники электромагнитного поля создаются как внутренними (эндогенными), так и внешними (экзогенными) источниками, можно разделить регистрируемое электромагнитное поле на две составляющие. Тогда вводится понятие вектора электромагнитного поля эндогенного происхождения ($\mathbf{Y} = \mathbf{E}_0 - \mathbf{Z} \cdot \mathbf{H}_0$), где \mathbf{Z} – импеданс нижнего полупространства; \mathbf{E}_0 – вектор измеренного электрического поля, \mathbf{H}_0 – вектор измеренного магнитного поля [38, 39]. Тогда математически интеграл $\int_0^{\Delta\omega} |Y(\omega)| d\omega$ показывает во временной области поведение энергетической характеристики электромагнитного поля эндогенного происхождения для широкого диапазона частот, что свидетельствует об активизации или затухании области всех источников на глубине [40].

На данный момент при автоматизированной обработке сейсмологических каталогов (сети KNET © НС РАН и KRNET © ИС НАН КР) (Excel-формат), графики были дополнены параметрами: расчёты временем относительно начала записи ($T_s = T_0 - T_{MT}$), глубиной (D) и энергетическим классом (K), азимутальным углом между пунктом мониторинга и эпицентром (Az), расстоянием от очага до станции (R) и [35].

Благодаря опции Surfer ‘classed post map’ гипоцентры землетрясений отображаются в виде специальных символов, например, звезд, где размер символа пропорционален энергетическому

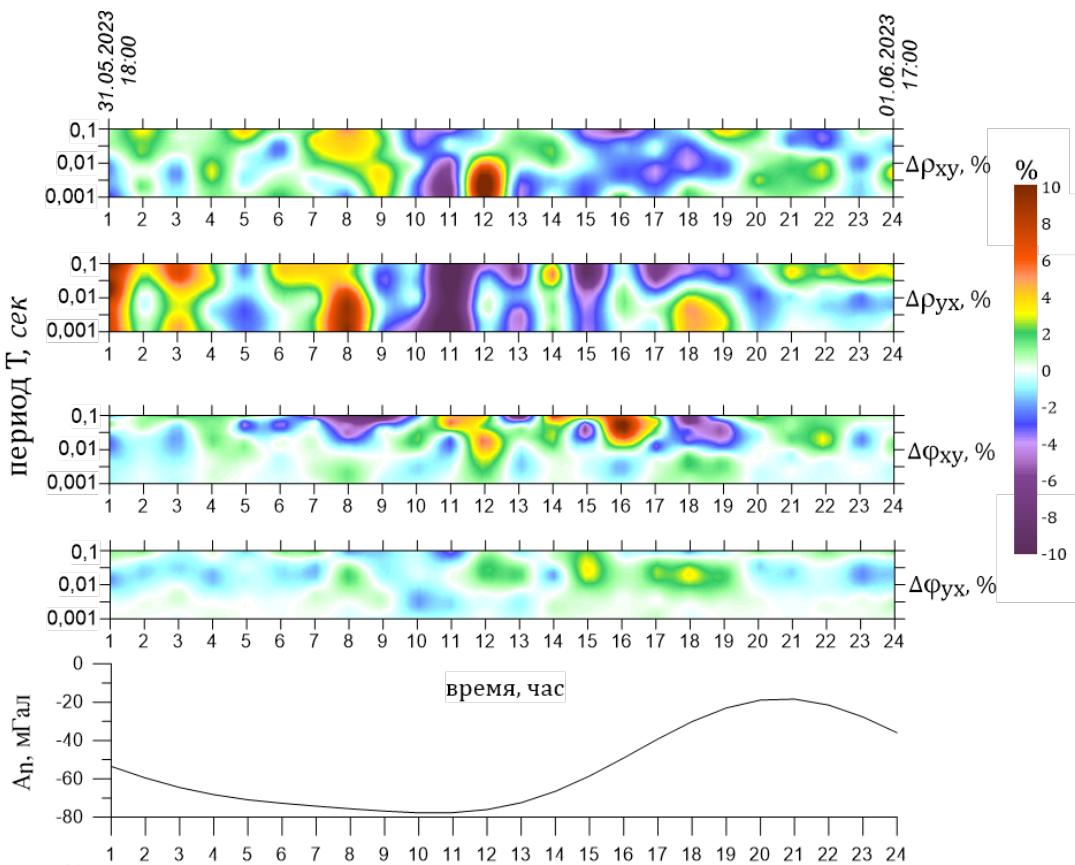


Рис. 3. Результат работы программы MTDataVar для визуализации ЧВР в мониторинговом пункте АМТЗ «Орто-Сай N2» для сопоставления относительных вариаций магнитотеллурических параметров с компонентами приливообразующего ускорения для пункта [37]

Fig. 3. The result of the MTDataVar program for visualizing the TFS at the monitoring point of the AMTS “Orto-Say N2” to compare the relative variations of magnetotelluric parameters with the components of the tidal acceleration for the point [37]

классу события, где строится зависимость между расстоянием между очагом землетрясения и координатой МТ пункта (R) и направлением на него (Az). Подробности приведены в работе [35]. На рис. 4 представлен пример получаемых графиков.

Результаты исследования

Полученные частотно-временные ряды относительных вариаций электромагнитных параметров (например, кажущегося сопротивления) отражают напряженно-деформированное состояние среды. ЧВР удобно из рассматривать для анализа и интерпретации в виде цветных псевдоразрезов выбранного параметра. Ранее не раз было показано, что:

- 1) установлена корреляция между вариациями кажущегося электросопротивления, лунно-солнечными приливными воздействиями и сейсмической активностью.
- 2) сейсмические события приурочены к экстремумам приливных колебаний: рост амплитуды вертикальной компоненты соответствует увеличению ρ_k , её минимум – снижению ρ_k .
- 3) наиболее выраженные вариации ρ_k , связанные с инициированными взрывом сейсмическими событиями, наблюдаются в верхней части разреза на глубинах до 10–15 км.
- 4) выявлена устойчивая связь между анизотропией электрического сопротивления и эндогенной характеристикой электромагнитного поля;

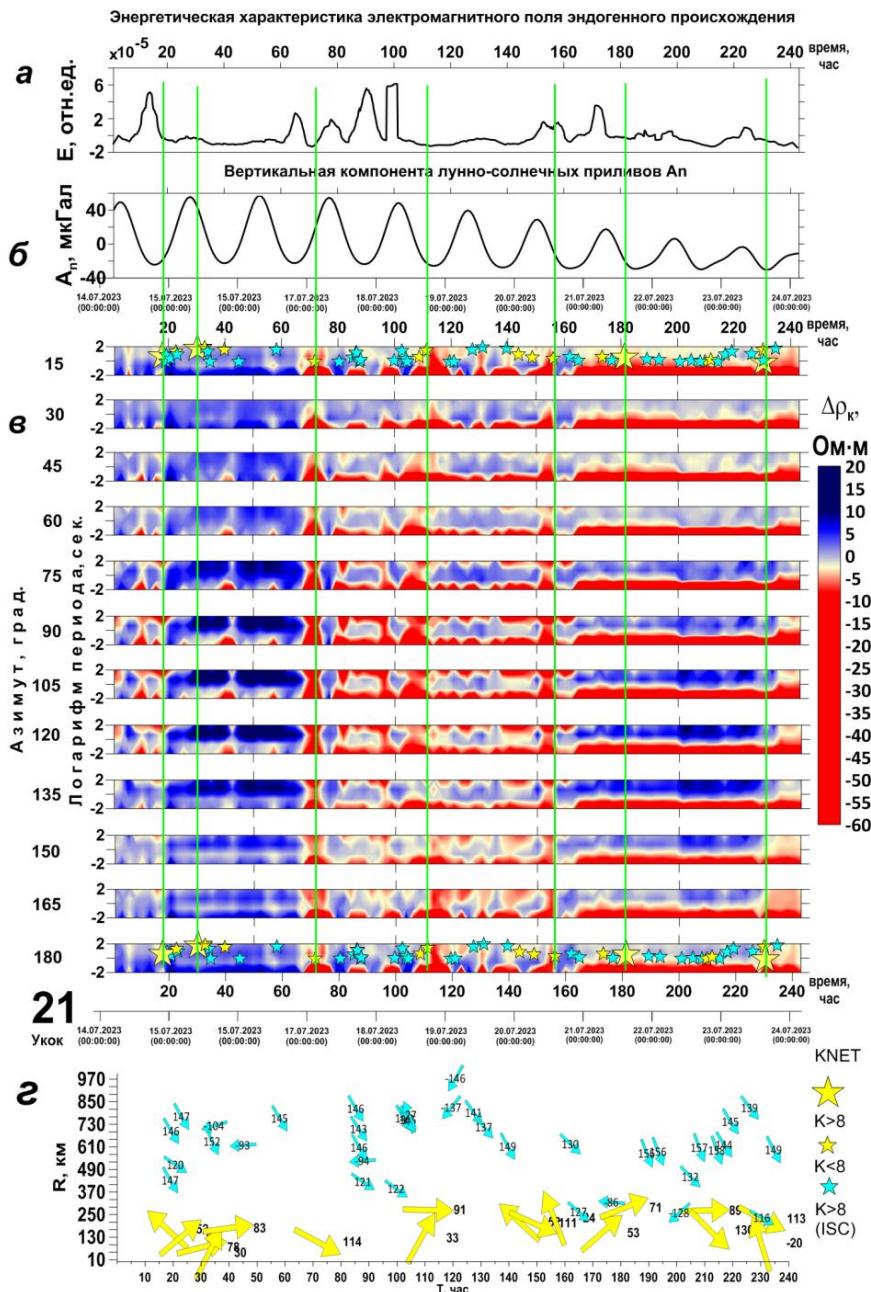


Рис. 4. Результат автоматизированного построения азимутальных псевдоразрезов (в) зависимостью МТ-мониторинга пункта Укок-2 за период 14.07.2023–24.07.2023 в сравнении с (а) энергетической характеристикой эндогенного электромагнитного поля, (б) вертикальной компонентой лунно-солнечных приливов (An) и (г) относительным пространственным положением эпицентров землетрясений. В качестве источников данных использованы сейсмологические каталоги: Кыргызстана (KNET) и международного сейсмологического центра (ISC)

Fig. 4. The result of automated construction of azimuthal pseudo-sections (c) by the relationship of MT monitoring point Ukok-2 for the period 14.07.2023–24.07.2023 in comparison with (a) the energy characteristic of the endogenous electromagnetic field, (b) the vertical component of lunisolar tides (An) and (d) the relative spatial position of earthquake epicenters. The seismological catalogs of Kyrgyzstan (KNET) and International seismological centre (ISC) were used as data sources

5) некоторые азимуты по отношению к мониторинговым пунктам БГП часто являются наиболее чувствительными, что было доказано на примере пункта Аксу для угла 57° [Баталева и др., 2014];

6) чувствительность компонент электромагнитного поля к сейсмическим событиям и взрывам дает основания рассматривать его вариации как индикатор современных геодинамических процессов.

Заключение

Данная работа направлена на оптимизацию обработки и интерпретации данных магнитотеллурического мониторинга, выполняемого в сейсмоактивном регионе. На данный момент ведутся дополнительные тестирования возможностей расширения функционала и удобства перечисленных средств анализа. В дальнейшем планируется проанализировать взаимосвязь частоты смены знака вариаций и азимута между событиями, наличие кластеров (сейсмогенерирующей зоны), так и самих амплитуд вариаций. Выполнить оптимизацию обработки данных на основе модифицированного обучения нейронной сети.

На данный момент стоит первостепенная задача систематизации накопленного материала магнитотеллурического мониторинга, также совершенствования процесса интерпретации и отслеживания смены картины на псевдоразрезах. Вероятно, для этих целей следует применить «цифровое зрение» или нейросетевые алгоритмы.

Литература

1. Рыбин А.К., Баталев В.Ю., Баталева Е.А., Матюков В.Е., Непеина К.С., Забинякова О.Б. Особенности применения методов магнитотеллурического и магнитовариационного зондирования в горах Тянь-Шаня. *Наука и технологические разработки*. 2023;102(2-3):4-39. DOI: 10.21455/std2023.2-3-1.
2. Cardoso L.H., Bacellar L.D.A.P. Assessment of geoelectrical configurations using reduced physical models for the structural mapping of rock mass and fractured aquifers. *Journal of Applied Geophysics*. 2021;191:104368. DOI: 10.1016/j.jappgeo.2021.104368.
3. Неведрова Н.Н., Пономарев П.В. Результаты многолетнего мониторинга электрофизических параметров в сейсмоактивной зоне горного Алтая методами постоянного тока. *Интерэкспо Гео-Сибирь*. 2018;3:281-287. DOI: 10.18303/2618-981X-2018-3-281-287.
4. Неведрова Н.Н., Шалагинов А.Е. Мониторинг электромагнитных параметров в зоне сейсмической активизации Горного Алтая. *Геофизика*. 2015;1:31–40.
5. Трапезников Ю.А., Андреева Е.В., Баталев В.Ю., Бердичевский М.Н., Ваньян Л.Л., Волыхин А.М., Голубцова Н.С., Рыбин А.К. Магнитотеллурические зондирования в горах Киргизского Тянь-Шаня. *Физика Земли*. 1997;1:3-20.
6. Баталев В.Ю., Бердичевский М.Н., Голланд М.Л., Голубцова Н.С., Кузнецов В.А. Интерпретация глубинных магнитотеллурических зондирований в Чуйской межгорной впадине. *Физика Земли*. 1989;9:42–45.
7. Баталев В.Ю., Баталева Е.А., Матюков В.Е., Рыбин А.К. Изучение необратимых деформаций в литосфере Тянь-Шаня по магнитотеллурическим данным (методологический аспект). *Вестник Камчатской региональной ассоциации Учебно-научный центр. Серия: Науки о Земле*. 2019;2(42):42-56. DOI: 10.31431/1816-5524-2019-2-42-42-56.
8. Баталев В.Ю., Волыхин А.М., Рыбин А.К., Трапезников Ю.А., Финякин В.В. Глава 8. Строение земной коры восточной части Киргизского Тянь-Шаня по данным МТЗ и ГМТЗ. *Проявление геодинамических процессов в геофизических полях* / Отв. ред. Е.П. Велихов, В.А. Зейгарник. М: Наука, 1993:96–113.
9. Баталева Е.А., Мухамадеева В.А. Комплексный электромагнитный мониторинг геодинамических процессов Северного Тянь-Шаня (Бишкекский геодинамический полигон). *Геодинамика и тектонофизика*. 2018; 9(2):461–487. DOI: 10.5800/GT-2018-9-2-0356.
10. Рыбин А.К., Баталев В.Ю., Ильичев П.В., Щелочков Г.Г. Магнитотеллурические и магнитовариационные исследования Киргизского Тянь-Шаня. *Геология и геофизика*. 2001; 42(10):1566-1173.
11. Рыбин А.К., Спичак В.В., Баталев В.Ю., Баталева Е.А., Матюков В.Е. Площадные магнитотеллурические зондирования в сейсмоактивной зоне Северного Тянь-Шаня. *Геология и геофизика*. 2008;5:445-460.

12. Рыбин А.К., Баталева Е.А., Баталев В.Ю., Матюков В.Е. Вариации электросопротивления земной коры по результатам магнитотеллурического мониторинга сейсмоактивных зон Тянь-Шаня. *Вестник КРСУ*. 2011;11(4):29-40.
13. Жамалетдинов А.А., Митрофанов Ф.П., Токарев А.Д., Шевцов А.Н. Влияние лунно-суточных приливных деформаций на электропроводность и флюидный режим земной коры. *Докл. РАН*. 2000; 371(2):235–239.
14. Рыбин А.К., Баталева Е.А., Непеина К.С., Матюков В.Е. Объемно-пространственная сегментация литосферы Тянь-Шаня по данным геофизических исследований. *Геодинамика и тектонофизика*. 2021;12(3):508-543. DOI: 10.5800/GT-2021-12-3-0537.
15. Баталева Е.А. Результаты мониторинга зон динамического влияния разломных структур Северного Тянь-Шаня. *Интерэкспо ГЕО-Сибирь*. 2022;2(2):332-339.
16. Баталева Е.А., Баталев В.Ю., Рыбин А.К. К вопросу о взаимосвязи вариаций электропроводности земной коры и геодинамических процессов. *Физика Земли*. 2013;3:105-113. DOI: 10.7868/S0002333713030034.
17. Брагин В.Д. Электромагнитные исследования эффектов, обусловленных мощным промышленным взрывом в районе Нарынского каскада гидроэлектростанций (Камбарата). *Вестник КРСУ*. 2011;11(4):46-53.
18. Баталева Е.А., Баталев В.Ю. Разработка программ анализа данных азимутального магнитотеллурического мониторинга. Часть 1. Анализ данных магнитотеллурического мониторинга. *Вестник КРСУ*. 2014;14(7):3-7.
19. Баталева Е.А., Баталев В.Ю. Разработка программ анализа данных азимутального магнитотеллурического мониторинга. Часть 2. Разработка программного обеспечения для анализа данных МТ-мониторинга. *Вестник КРСУ*. 2014;14(7):8-12.
20. Баталева Е.А., Баталев В.Ю. Детальный ретроспективный анализ данных магнитотеллурического мониторинга (Бишкекский геодинамический полигон). *Вестник КРСУ*. 2017;17(12):141-144.
21. Bataleva E.A. Processing, analysis and interpretation of time-frequency series for magnetotelluric monitoring. *IOP Conference Series: Earth and Environmental Science: 2019th International Symposium on Earth Sciences: History, Contemporary Issues and Prospects*. 2019;350:012053. DOI: 10.1088/1755-1315/350/1/012053.
22. Баталева Е.А., Баталев В.Ю. Анализ результатов Камбаратинского эксперимента с привлечением методики синхронных измерений. *Вестник КРСУ*. 2017;17(1):181-184.
23. Rybin A., Bataleva E., Nepeina K., Matiukov V., Alexandrov P., Kaznacheev P. Response of cracking processes in variations of geophysical fields. *Journal of Applied Geophysics*. 2020;181:104144. DOI: 10.1016/j.jappgeo.2020.104144.
24. Nepeina K., Bataleva E., Alexandrov P. Electromagnetic Monitoring of Modern Geodynamic Processes: An Approach for Micro-Inhomogeneous Rock through Effective Parameters. *Applied Sciences (Switzerland)*. 2023;13(14):8063. DOI: 10.3390/app13148063.
25. Ялов Т.В. Электрическая анизотропия горизонтально-неоднородных сред. Диссертация ... к. т. н. ФГБОУ ВПО МГУ имени М.В. Ломоносова. 2014:106 с.
26. Шалагинов А.Е., Неведрова Н.Н., Санчай А.М., Шапаренко И.О., Пономарев П.В. Электрическая анизотропия по данным методов постоянного тока в районе Быстровского полигона (берег водохранилища в Новосибирской области). *Интерэкспо Гео-Сибирь*. 2019;2(2):158-164.
27. Сухорукова К.В., Петров А.М. Электрическая анизотропия терригенных отложений: краткий обзор подходов к ее определению по данным электрокаротажа в вертикальных скважинах. *Геофизические технологии*. 2021;3:41-66. DOI: 10.18303/2619-1563-2021-3-41.
28. Luo T., Hu X., Chen L., Xu, G. Investigating the Magnetotelluric Responses in Electrical Anisotropic Media. *Remote Sens.* 2022;14:2328. DOI: 10.3390/rs14102328.
29. Busby J., Jackson P. The application of time-lapse azimuthal apparent resistivity measurements for the prediction of coastal cliff failure. *Journal of Applied Geophysics*. 2006;59(4):261-272. DOI: 10.1016/j.jappgeo.2005.10.004.
30. Salam R., Parnadi W.W. Laboratory-scaled Azimuthal Resistivity Survey for Fracture Detection. *IOP Conf. Ser: Earth Environ. Sci.* 2021;873:012079. DOI: 10.1088/1755-1315/873/1/012079.
31. Gasimov E., Pekşen E., Durdağ D., Salamov A., Najafov O. Modeling and interpretation of electrical resistivity data in anisotropic media using a generalized regression neural network: A case study on the Lokbatan mud volcano, Azerbaijan. *Journal of Applied Geophysics*. 2024;224:105365. DOI: 10.1016/j.jappgeo.2024.105365.

32. Непеина К.С., Валуйский А.Ю. Технологический подход разделения непрерывных данных магнитотеллурического зондирования для сейсмо-электромагнитных исследований. *Современные техника и технологии в научных исследованиях. Бишкек: Федеральное государственное бюджетное учреждение науки Научная станция Российской академии наук в г. Бишкеке*, 2021:159-167.
33. Сайт ООО «Северо-Запад» [<https://nw-geo.ru/>] (Дата обращения 21.11.2024).
34. Zorin N., Aleksanova E., Shimizu H., Yakovlev D. Validity of the dispersion relations in magnetotellurics: Part I-theory. *Earth, Planets and Space*. 2020;72(1):9. DOI: 10.1186/s40623-020-1133-4.
35. Непеина К.С., Матюков В.Е. Развитие методики визуального сопоставления результатов азимутального магнитотеллурического мониторинга с параметрами сейсмических событий. *Интерэкспо ГеоСибирь*. 2022;2(2):150-157. DOI: 10.33764/2618-981X-2022-2-2-150-157.
36. Бердичевский М.Н., Дмитриев В.И., Новиков Д.Б., Пастуцан В.В. Анализ и интерпретация магнитотеллурических данных. М: Диалог-МГУ, 1997:161 с.
37. Забинякова О.Б., Рыбин А.К. Программа MTDataVar расчета вариаций мониторинговых магнитотеллурических данных. Свидетельство на программу ЭВМ; RU 2023686394 Роспатент. 2023.
38. Рыбин А.К., Баталева Е.А., Александров П.Н., Непеина К.С. Электромагнитные исследования современных геодинамических процессов литосфера областей внутриконтинентальной орогении, на примере Тянь-Шаня. *Физика Земли*. 2022;5:98-115. DOI: 10.31857/S0002333722050234.
39. Баталев В.Ю., Баталева Е.А., Рыбин А.К., Александров П.Н., Матюков В.Е., Непеина К.С., Забинякова О.Б., Казначеев П.А. Теоретические обоснования исследований деформационных процессов в литосфере Земли на основе сейсмических и электромагнитных полей эндогенного происхождения. Математическое моделирование процессов и систем. Коллективная монография по материалам пленарных докладов VIII Международной молодежной научно-практической конференции 4-7 октября 2018 г. Ч. I / С.А. Мустафина (отв. ред.). Стерлитамак: Стерлитамакский филиал БашГУ. 2018:95-122.
40. Александров П.Н., Баталева Е.А. Программа разделения электромагнитного поля по положению источников по данным магнитотеллурических зондирований. RU 2019618606. Роспатент. 2019.

References

1. Rybin AK, Batalev VYu, Bataleva EA, et al. Application features of magnetotelluric and magnetic-variation sounding methods in the Tien Shan mountains. *Science and Technological Developments*. 2023;102. No. 2-3:4-39. DOI: 10.21455/std2023.2-3-1 (in Russian).
2. Cardoso LH, Bacellar LDAP. Assessment of geoelectrical configurations using reduced physical models for the structural mapping of rock mass and fractured aquifers. *Journal of Applied Geophysics*. 2021;191:104368. DOI: 10.1016/j.jappgeo.2021.104368.
3. Nevedrova NN, Ponomarev PV. Multi-year monitoring results of electrophysical parameters in Altai mountains seismoactive area by direct current resistivity methods. *Interexpo GEO-Siberia*. 2018;3:281-287. DOI: 10.18303/2618-981X-2018-3-281-287.
4. Nevedrova NN, Shalaginov AE. Monitoring of electromagnetic parameters in the seismic activity zone of Gornii Altai. *Journal of geophysics*. 2015. No. 1:31–40 (in Russian).
5. Trapeznikov YuA, Andreeva EV, Batalev VYu, et al. Magnetotelluric soundings in the Kyrgyz Tien Shan mountains. *Physics of the Solid Earth*. 1997;1:3–20 (in Russian).
6. Batalev VYu, Berdichevsky MN, Golland ML, et al. Interpretation of deep magnetotelluric soundings in the Chuya intermontane depression. *Izvestiya. Physics of the Solid Earth*. 1989;9:42–45 (in Russian).
7. Batalev VYu, Bataleva EA, Matyukov VE, et al. Study of irreversible deformations in the Tien Shan lithosphere based on magnetotelluric data (methodological aspect). *Bulletin of Kamchatka regional association «Educational-scientific center». Earth sciences*. 2019;2(42):42-56 (in Russian) DOI: 10.31431/1816-5524-2019-2-42-42-56.
8. Batalev VYu, Volykhin AM, Rybin AK, et al. The structure of the Earth's crust in the eastern part of the Kyrgyz Tien Shan according to the data of the Moscow Geophysical Survey and the State Geophysical Center. Chapter 8. *Manifestations of geodynamic processes in geophysical fields*. Moscow: Nauka; 1993:96–112 (in Russian).
9. Bataleva EA, Mukhamadeeva VA. Complex electromagnetic monitoring of geodynamic processes in the Northern Tien Shan (Bishkek Geodynamic Test Area). *Geodynamics & Tectonophysics*. 2018;9(2):461-487. DOI: 10.5800/GT-2018-9-2-0356. (in Russian)

10. Rybin AK, Batalev VYu, Il'chev PV, et al. Magnetotelluric and magnetovariational studies of the Kyrgyz Tien Shan. *Russian Geology and Geophysics*. 2001;42 (10):1566-1173 (in Russian).
11. Rybin AK, Spichak VV, Batalev VYu, et al. Array magnetotelluric soundings in the active seismic area of Northern Tien Shan. *Russian Geology and Geophysics*. 2008. 49(5):337-349 (in Russian). DOI: 10.1016/j.rgg.2007.09.014.
12. Rybin AK, Bataleva EA, Batalev VYu, et al. Variations in the electrical resistivity of the Earth's crust based on the results of magnetotelluric monitoring of seismically active zones of the Tien Shan. *Vestnik KRSU*. 2011;11(4):29-40 (in Russian).
13. Zhamaletdinov AA, Mitrofanov FP, Tokarev AD, et al. The influence of lunar and solar tidal deformations on electrical conductivity and fluid regime of the Earth's crust. *Doklady Earth Sciences*. 2000;371:403-407 (in Russian).
14. Rybin AK, Bataleva EA, Nepeina KS, et al. Volumetric and spatial segmentation of the Tien Shan lithosphere according to geophysical data. *Geodynamics & Tectonophysics*. 2021;12(3):508-543. DOI: 10.5800/GT-2021-12-3-0537. (in Russian).
15. Bataleva EA. The results of monitoring the zones of dynamic influence of the fault structures of the Northern Tien Shan. *Interexpo GEO-Siberia*. 2022;2(2):332-339 (in Russian).
16. Bataleva EA, Batalev VY, Rybin AK. On the question of the interrelation between variations in crustal electrical conductivity and geodynamical processes. *Izvestiya, Physics of the Solid Earth*. 2013;49(3):402-410. DOI: 10.1134/S1069351313030038.
17. Bragin VD. Electromagnetic studies of the effects caused by a powerful industrial explosion in the area of the Naryn cascade of hydroelectric power plants (Kambarata). *Vestnik KRSU*. 2011;11(4):46-53 (in Russian).
18. Bataleva EA, Batalev VYu. Development of programs to analyze the data on azimuthal magnetotelluric monitoring Part 1. Analysis of magnetotelluric monitoring data. *Journal "Herald of KRSU"*. 2014;14(7):3-7 (in Russian).
19. Bataleva EA, Batalev VYu. Development of programs to analyze the data on azimuthal magnetotelluric monitoring Part 2. Development of software for analysis of MT-monitoring data. *Journal "Herald of KRSU"*. 2014;14(7):8-12 (in Russian).
20. Bataleva EA, Batalev VYu. Detailed retrospective analysis of magnetotelluric monitoring data (Bishkek Geodynamic Test). *Journal "Herald of KRSU"*. 2017;17(12):141-144 (in Russian).
21. Bataleva EA. Processing, analysis and interpretation of time-frequency series for magnetotelluric monitoring. *IOP Conference Series: Earth and Environmental Science: 2019th International Symposium on Earth Sciences: History, Contemporary Issues and Prospects*. 2019;350:012053. DOI: 10.1088/1755-1315/350/1/012053.
22. Bataleva EA, Batalev VYu. The results of an analysis of the Kambarata experiment with attraction synchronous measurement technique. *Journal "Herald of KRSU"*. 2017;17(1):181-184 (in Russian).
23. Rybin A, Bataleva E, Nepeina K, et al. Response of cracking processes in variations of geophysical fields. *Journal of Applied Geophysics*. 2020;181:104144. DOI: 10.1016/j.jappgeo.2020.104144.
24. Nepeina K, Bataleva E, Alexandrov P. Electromagnetic Monitoring of Modern Geodynamic Processes: An Approach for Micro-Inhomogeneous Rock through Effective Parameters. *Applied Sciences (Switzerland)*. 2023;13(14):8063. DOI: 10.3390/app13148063.
25. Yalov TV. Electrical anisotropy of horizontally inhomogeneous media. Candidate's dissertation (Engineering). Lomonosov Moscow State University. 2014:106 (in Russian).
26. Shalaginov AE, Nevedrova NN, Sanchaa AM, et al. Electrical anisotropy according to dc methods in the Bystrovka field area (shore reservoir in the Novosibirsk region). *Interexpo GEO-Siberia*. 2019;2(2):158-164 (in Russian).
27. Suhorukova KV, Petrov AM. Electrical anisotropy of terrigenous deposits: a brief overview of approaches to its determination from electrical logging data in vertical wells. *Russian Journal of Geophysical Technologies*. 2021;3:41-66. DOI: 10.18303/2619-1563-2021-3-41. (in Russian)
28. Luo T, Hu X, Chen L, et al. Investigating the Magnetotelluric Responses in Electrical Anisotropic Media. *Remote Sens.* 2022;14:2328. DOI: 10.3390/rs14102328.
29. Busby J. The application of time-lapse azimuthal apparent resistivity measurements for the prediction of coastal cliff failure. *Journal of Applied Geophysics*, 2006;59(4):261-272. DOI: 10.1016/j.jappgeo.2005.10.004.

30. Salam R, Parnadi WW. Laboratory-scaled Azimuthal Resistivity Survey for Fracture Detection. *IOP Conf. Ser: Earth Environ. Sci.* 2021;873:012079. DOI: 10.1088/1755-1315/873/1/012079.
31. Gasimov E, Pekşen E, Durdağ D, et al. Modeling and interpretation of electrical resistivity data in anisotropic media using a generalized regression neural network: A case study on the Lokbatan mud volcano, Azerbaijan. *Journal of Applied Geophysics*. 2024;224:105365. DOI: 10.1016/j.jappgeo.2024.105365.
32. Nepeina KS, Valuyskiy AYU. *Technological approach to separating continuous magnetotelluric sounding data for seismoelectromagnetic studies. Modern engineering and technology in scientific research*. Bishkek: Research Station of the Russian Academy of Sciences in Bishkek, 2021:159–167 (in Russian).
33. Internet site Nord-West Ltd [<https://nw-geo.ru/>] (Date of access 21.11.2024).
34. Zorin N, Aleksanova E, Shimizu H, et al. Validity of the dispersion relations in magnetotellurics: Part I-theory. *Earth, Planets and Space*. 2020;72(1):9. DOI: 10.1186/s40623-020-1133-4.
35. Nepeina KS, Matiukov VE. Upgrading of a technique for visual comparing for the results of azimuthal magnetotelluric monitoring with the seismic events parameters. *Interexpo GEO-Siberia*. 2022;2(2):150-157 (In Russian). DOI: 10.33764/2618-981X-2022-2-2-150-157.
36. Berdichevskii MN, Dmitriev VI, Novikov DB, et al. Analysis and Interpretation of the Magnetotelluric Data. *Dialog-MGU, Moscow*. 1997:161 (In Russian).
37. Zabinyakova OB, Rybin AK. Programma MTDataVar rascheta variatsiy monitoringovykh magnitonitelluricheskikh dannykh. Software RU 2023686394 Rospatent. 2023 (In Russian).
38. Rybin AK, Bataleva EA, Aleksandrov PN, Nepeina KS. Electromagnetic studies of present geodynamic processes in the lithospheres of the regions of intracontinental orogeny: the Tien Shan example. *Izvestiya, Physics of the Solid Earth*. 2022;58(5):690-705. DOI: 10.1134/s1069351322050093.
39. Batalev, V.Yu., Bataleva, E.A., Rybin, A.K., Aleksandrov, P.N., Matiukov, V.E., Nepeina, K.S., Zabinyakova, O.B., and Kaznacheev, P.A., Theoretical substantiation of studies of deformation processes in the Earth's lithosphere based on seismic and electromagnetic fields of endogenous origin, Mater. VIII Mezhdunar. molodezchnoi nauchn.-prakt. konf.: Matematicheskoe modelirovaniye protsessov i sistem, Ch. 1 (Proc. VIII Int. Youth Sci. Appl. Res. Conf.: Mathematical Modeling of Processes and Systems, Part 1), Mustafina, S.A., Ed., Sterlitamak, 2018, Sterlitamak: Sterlitamakskii filial BashGU. 2018:95-122 (in Russian).
40. Aleksandrov PN, Bataleva EA. Programma razdeleniya elektromagnitnogo polya po polozheniyu istochnikov po dannym magnitonitelluricheskikh zondirovaniy. RU 2019618606. Rospatent. 2019.

Об авторах

RCID: 000-0003-0725-8023, ResearcherID: A-9203-2014, Scopus Author ID: 56241170100, SPIN: 1665-8376
e-mail: nepeina.k@mail.ru

БАТАЛЕВА Елена Анатольевна – зав. лаб., в.н.с. ФГБУН Научная станция РАН в г. Бишкеке, г. Бишкек, Кыргызстан, ORCID: 0000-0002-0279-7469, ResearcherID: AAB-1316-2020, Scopus Author ID: 10043212200, SPIN: 4666-1058

e-mail: elena.bataleva@gmail.com

About the authors

Ksenia S. NEPEINA – Senior scientific researcher, Research Station RAS in Bishkek, Bishkek, Kyrgyzstan, ORCID: 000-0003-0725-8023, ResearcherID: A-9203-2014, Scopus Author ID: 56241170100, SPIN: 1665-8376

E-mail: nepeina.k@mail.ru

Elena A. BATALEVA – Head of the Laboratory, Lead scientific researcher, Research Station RAS in Bishkek, Bishkek, Kyrgyzstan, ORCID: 0000-0002-0279-7469, ResearcherID: AAB-1316-2020, Scopus Author ID: 10043212200, SPIN: 4666-1058

E-mail: elena.bataleva@gmail.com

Вклад авторов

Непеина К.С. – разработка концепции, написание оригинального текста, редактирование рукописи, визуализация

Баталева Е.А. – написание оригинального текста, методология, верификация данных, проведение исследования, администрирование данных, получение финансирования

Authors' contribution

Nepeina K.S. – conceptualization, writing original draft, editing, visualization

Bataleva E.A. – writing original draft, methodology, validation, investigation, data curation, funding acquisition

Конфликт интересов

Авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов.

Conflict of interests

The authors declare no conflicts of interests.

Поступила в редакцию / Submitted 05.10.2025

Поступила после рецензирования / Revised 28.11.2025

Принята к публикации / Accepted 24.12.2025

ТЕКТОНО-МАГМАТИЧЕСКИЕ ФАКТОРЫ КОНТРОЛЯ РОССЫПНОЙ И РУДНОЙ ЗОЛОТОНОСНОСТИ ЦЕНТРАЛЬНО-АЛДАНСКОГО РАЙОНА (ЮЖНАЯ ЯКУТИЯ)

О. Г. Третьякова, М. Ф. Третьяков*

Северо-Восточный федеральный университет им. М.К. Аммосова,
г. Якутск, Российской Федерации

*og.tretiakova@s-vfu.ru

Аннотация

В статье представлены обобщенные результаты комплексного исследования тектоно-магматических факторов контроля россыпной и рудной золотоносности Центрально-Алданского района (ЦАР) – классической провинции тектоно-магматической активизации. На основе анализа фондовых материалов, опубликованных данных и работ ведущих специалистов по региону установлено, что современная геодинамическая модель региона является результатом наложения разновременных тектонических этапов: архейского (формирование кристаллического фундамента), платформенного (накопление венд-нижнекембрийского карбонатного чехла), мезозойского активизационного и неотектонического. Детальный анализ с привлечением работ Ветлужских В.Г., Кочеткова А.Я., Бойцова В.Е. и Максимова Е.П. позволил обосновать ведущую роль мезозойской тектоно-магматической активизации в формировании уникальной рудно-магматической системы. Установлена дискретная двухэтапная модель рудообразования: ранняя стадия (~160 млн лет) подготовила рудолокализующие структуры, а основная минерализация (~145-140 млн лет) связана с поступлением рудоносных флюидов. Именно в этот период произошла реактивизация древних глубинных разломов, внедрение многофазных интрузий щелочно-гранитоидного состава и сформировалась подавляющая часть коренного (Лебединское, Колтыконское поля) и сопряженного с ним россыпного оруденения.

Выявлены пространственно-временные связи между зонами разломов, мезозойским магматизмом и локализацией рудных объектов. Установлены критерии контроля оруденения, включая приуроченность к узлам пересечения разломов и связь с конкретными интрузивными комплексами. Неотектонический этап, характеризующийся образованием грабен-долин, предопределил конечную локализацию и сохранность россыпных месторождений. Текущая модель имеет фундаментальное значение для понимания металлогенеза Алданского щита и служит основой для разработки усовершенствованных прогнозно-поисковых критериев на золото. Полученные результаты позволяют выделить наиболее перспективные направления для постановки поисковых работ в пределах Центрально-Алданского района. Материалы работы представляют значительный практический интерес для геологоразведочных организаций и недропользователей региона.

Ключевые слова: Центрально-Алданский район, золотоносность, тектоно-магматическая активизация, россыпи, рудные месторождения, мезозойский магматизм, геодинамическая модель, Южная Якутия

Для цитирования: Третьякова О.Г., Третьяков М.Ф. Тектоно-магматические факторы контроля россыпной и рудной золотоносности Центрально-Алданского района (Южная Якутия). *Вестник СВФУ*. 2025;(4): 57-65. DOI: 10.25587/2587-8751-2025-1-57-65

TECTONO-MAGMATIC CONTROLS ON PLACER AND LODE GOLD MINERALIZATION IN THE CENTRAL ALDAN DISTRICT (SOUTHERN YAKUTIA)

Olga G. Tretyakova*, Maksim F. Tretyakov

M.K. Ammosov North-Eastern Federal University,
Yakutsk, Russia
*og.tretiakova@s-vfu.ru

Abstract

The article presents generalized results of a comprehensive study of tectono-magmatic factors controlling placer and lode gold mineralization in the Central Aldan District (CAD) – a classic province of tectono-magmatic activation. Analysis of archival materials, published data, and research by leading regional specialists established that the modern geodynamic model of the region results from the superposition of several tectonic stages: Archean (formation of the crystalline basement), Platform (accumulation of Vendian–Lower Cambrian carbonate cover), Mesozoic activation, and Neotectonic. A detailed analysis incorporating the works of Vetrushskikh V.G., Kochetkov A.Y., Boytsov V.E., and Maximov E.P. substantiated the leading role of Mesozoic tectono-magmatic activation in the formation of a unique ore-magmatic system. Precisely during this period (220–145 Ma), the reactivation of ancient deep-seated faults, the emplacement of multiphase alkaline-granitoid intrusions, and the formation of the vast majority of both primary (Lebedinskoye, Koltykonskoye fields) and associated placer mineralization occurred.

Spatio-temporal relationships between fault zones, Mesozoic magmatism, and the localization of ore bodies have been identified. Ore control criteria have been established, including confinement to fault intersection nodes and association with specific intrusive complexes. The Neotectonic stage, characterized by the formation of graben-valleys, predetermined the final localization and preservation of placer deposits. The developed model is fundamental for understanding the metallogeny of the Aldan Shield and serves as a basis for developing enhanced predictive-exploration criteria for gold. The obtained results enable the identification of the most promising areas for exploration within the Central Aldan District. The research materials are of significant practical interest for geological survey organizations and subsoil users in the region.

Keywords: Central Aldan district, gold mineralization, tectono-magmatic activation, placers, lode deposits, Mesozoic magmatism, geodynamic model, Southern Yakutia

For citation: Tretiakova O.G., Tretiakov M.F. Tectono-magmatic controls on placer and lode gold mineralization in the Central Aldan district (Southern Yakutia). *Vestnik of North-Eastern Federal University. Earth Sciences*. 2025;(4): 57-65. DOI: 10.25587/2587-8751-2025-1-57-65

Введение

Центрально-Алданский район (ЦАР) традиционно относится к числу ключевых золотоносных провинций России, где с 1920-х годов ведется добыча как россыпного, так и рудного золота. Несмотря на длительную историю изучения, вопросы генезиса и пространственного распределения оруденения остаются предметом дискуссий [1]. Классические модели, связывающие золотоносность исключительно с архейскими зеленокаменными поясами, не в полной мере объясняют приуроченность крупнейших месторождений к зонам мезозойской активизации. В последние десятилетия сформировалась концепция, рассматривающая ЦАР как область тектono-магматической активизации древней платформы, где ведущая рудообразующая роль принадлежит мезозойским магматическим и гидротермальным процессам [2]. Значительный вклад в развитие этой концепции внесли работы Ветлужских В.Г. с соавторами [8], детально охарактеризовавшие золоторудную минерализацию и выделившие основные рудно-формационные типы, а также исследования Кочеткова А.Я., Бойцова В.Е. и Максимова Е.П. [9, 10, 11],

обосновавшие геодинамическую модель и роль магматизма и метасоматоза в локализации оруденения. В последние годы принципиально важные данные, уточняющие возрастные рамки мезозойского магматизма и минерализации, были получены в результате изотопно-геохронологических исследований Гаськова И.В. и др. [12], которые требуют интеграции в существующие геодинамические модели региона.

Целью данной работы является синтез фондовых геолого-геофизических материалов для построения целостной геодинамической модели ЦАР, объясняющей пространственно-временную связь рудной и россыпной золотоносности с разновременными этапами тектонического развития региона.

Для достижения этой цели в работе также проводится анализ и интеграция новейших изотопно-геохронологических данных [12], позволивших установить дискретный характер связи между магматизмом и рудообразованием.

Геолого-методические основы и результаты анализа факторов золотоносности

В основу работы положены результаты детальных геолого-структурных, минерагенических и геоморфологических исследований. Анализ тектонической структуры выполнен на основе дешифрирования данных геологической съемки масштаба 1:200 000 [3]. Для реконструкции этапов магматизма и метасоматоза использованы данные по составу и возрасту интрузивных комплексов и гидротермально-измененных пород [5, 8, 9]. Методика исследования включала: 1) геолого-структурный анализ для выявления взаимосвязей между разломной тектоникой, магматизмом и оруденением; 2) минерагенический анализ для установления парагенетических ассоциаций и этапов рудообразования; 3) геоморфологический анализ для реконструкции условий формирования и сохранности россыпей. Особое внимание удалено интерпретации данных по составу и возрасту мезозойских интрузивных комплексов и сопряженных с ними метасоматитов, с привлечением современных геохронологических данных [8, 10, 12].

Многоэтапное геологическое строение Центрально-Алданского района

Строение района (рис.) характеризуется наличием четырех структурных этажей, каждый из которых внес вклад в формирование минерагенического облика территории [4].

- *Первый (архейский) структурный этаж* представлен архейскими образованиями верхнеалданской и федоровской серий, сложенными биотитовыми плагиогнейсами, роговообманково-диопсидовыми сланцами, а также метагаббро и метапироксенитами. Эти породы слагают наиболее эродированные части Эльконского горста и формируют кристаллический фундамент региона. Именно на этом этапе заложилась северо-западная и субширотная ориентировка основных структур, таких как Нижне-тимптонский купол, осложненный антиклиновыми формами (Селигдарская, Томмотская синформы), что определило формирование складчато-блокового фундамента региона.

- *Второй (платформенный) этаж* сложен субгоризонтально залегающими (падение около 1° на север) венд-нижнекембрийскими карбонатными и терригенными отложениями, выполняющими Среднеленскую моноклизу. В его строении участвуют пестроцветная, тумулдурская и унгелинская свиты, представленные розовато-серыми глинистыми доломитами, мергелями, строматолитовыми и массивными доломитами общей мощностью до 190 м. Спокойный тектонический режим формирования был нарушен лишь в девоне, что проявилось в активизации разломов и внедрении даек долеритов.

- *Ключевой третий этаж мезозойской активизации* связан с интенсивным щелочным магматизмом. Современные геохронологические исследования [12] позволяют детализировать эту модель, выделив два главных импульса, значимых для рудообразования: раннепозднеюрский (~160 млн лет) и раннемеловой (~145-140 млн лет). Интрузивные тела (штоки, лакколиты, дайки) ассоциируют с кольцевыми структурами (Томмотская, Якутская кальдеры диаметром около 5 км). С этим этапом напрямую связано образование золоторудных месторождений

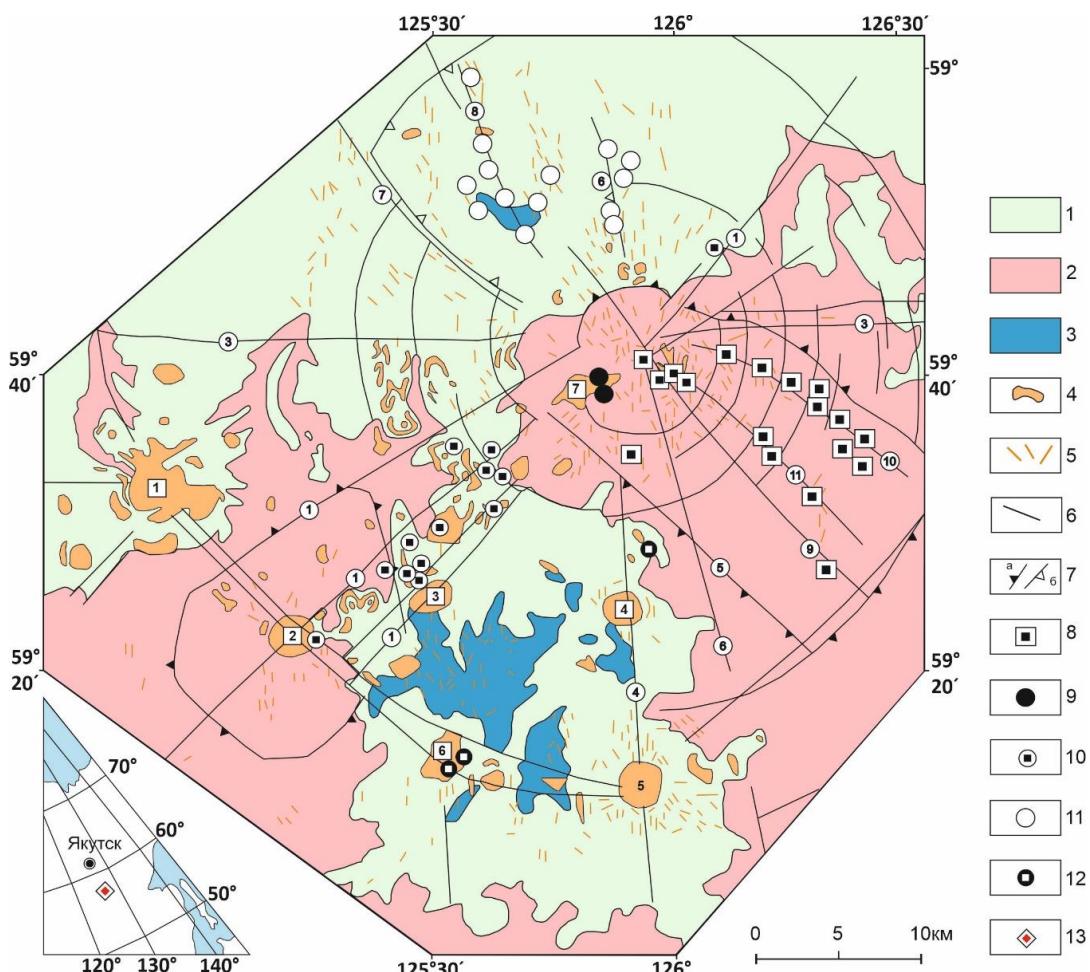


Рис. Геолого-структурная схема ЦАР [7]. 1 – раннедокембрийский кристаллический фундамент; 2 – венд-нижнекембрийский платформенный чехол; 3 – терригенные отложения нижней и средней юры; 4, 5 – щелочные и умереннощелочные магмопроявления: интрузии (4) и дайки (5); 6 – разломы; 7 – блоки границ: а – подъемий, б – впадин; 8–12 – геолого-промышленные типы месторождений мезозойского возраста: Au-U (8), Au-Cu порфировый (9), Au-сульфидный (10), куранахский (Au) (11), самолазовский (12). Наиболее крупные интрузивные массивы (цифры в квадратиках): 1 – Инаглинский, 2 – Томмотский, 3 – Якокутский, 4 – Джекондинский, 5 – Йллымахский, 6 – Юхтинский, 7 – Рябиновый. Наиболее крупные линейные разломы (цифры в кружках): 1 – Томмотский, 2 – Юхтино-Пуриканский, 3 – Северо-Алданский, 4 – Джекондинский, 5 – Юхухтинский, 6 – Байанай-Йллымахский, 7 – Куранахский, 8 – Центрально-Куранахский (Байанай-Куранахский), 9 – Юкунгринский, 10 – Южный, 11 – Сох-Солоохский. 13 – Положение Центрально-Алданского рудного района

Fig. Geological-structural scheme of the Central Aldan District [7]. 1 – Early Precambrian crystalline basement; 2 – Vendian–Lower Cambrian platform cover; 3 – Lower–Middle Jurassic terrigenous deposits; 4, 5 – Alkaline and moderately alkaline magmatic manifestations: intrusions (4) and dikes (5); 6 – Faults; 7 – Boundary blocks: a – uplifts, b – depressions; 8–12 – Mesozoic geological-industrial deposit types: Au-U (8), Au-Cu porphyry (9), Au-sulfide (10), Kuranakh-type (Au) (11), Samolazovsky-type (12). Major intrusive massifs (numbers in squares): 1 – Inaglinsky, 2 – Tommot, 3 – Yakokut, 4 – Dzekondinsky, 5 – Yllymakh, 6 – Yukhtin, 7 – Ryabinov. Major linear faults (numbers in circles): 1 – Tommot, 2 – Yukhtino-Purikan, 3 – North Aldan, 4 – Dzekondin, 5 – Yukhukhtin, 6 – Bayanay-Yllymakh, 7 – Kuranakh, 8 – Central Kuranakh (Bayanay-Kuranakh), 9 – Yukungrin, 10 – Yuzhny, 11 – Sokh-Solookh. 13 – Location of the Central Aldan ore district

Лебединского и Колтыконского полей, а также масштабных полей гидротермально-метасоматических пород (гумбейты, березиты, листвениты), контролируемых зонами горизонтального дробления и разломами.

- *Четвертый (неотектонический) этаж* обусловил формирование современного рельефа. Он выражен в образовании грабен-долин (более 20 структур), унаследовавших мезозойские разломные зоны (например, Якокутский разлом). Долины рек Селигдар, Бол. Куранах, Якокит имеют корытообразный поперечный и ступенчатый продольный профили, а мощность рыхлых кайнозойских отложений в них достигает 60-110 м. Эти грабен-долины и стали главными коллекторами для россыпей золота, таких как Орто-Сала, Селигдар и Бол. Куранах.

Рудообразующие процессы мезозойского этапа

Мезозойский этап, охватывающий интервал от позднего триаса до раннего мела (220-138 млн лет), является определяющим для формирования золотого оруденения [5, 8, 12]. Реконструкция последовательности событий, выполненная на основе данных [12], показывает, что пики магматической активности (220-205, 172-165, 145-138 млн лет) непосредственно предшествовали или были синхронны основным эпизодам гидротермального рудообразования.

Детальные изотопно-геохронологические исследования (U-Pb по циркону, Ar-Ar по слюдам) последних лет уточнили представления о временных рамках и этапности рудообразования [12]. Установлено, что формирование золотого оруденения носило дискретный характер и было тесно связано с последовательными фазами мезозойского магматизма. Для Лебединского рудного поля надежно обоснована двухэтапная модель. Первый этап (160 млн лет), соответствующий внедрению щелочногранитных интрузий, не сопровождался массовым рудоотложением, но сыграл критически важную подготовительную роль. Он привел к формированию обширных полей березитовых метасоматитов, создавших благоприятную геохимическую среду и подготовивших рудолокализующие структуры. Второй, основной рудообразующий этап (145-140 млн лет), синхронный внедрению дайковых серий, обеспечил поступление глубинных флюидов, непосредственно сформировавших промышленные концентрации золота в кварц-сульфидных жилах и прожилках.

Активизация глубинных разломов (Томмотский, Якокутский, Юхтинский и др.) способствовала подъему мантийных магм и формированию гипабиссальных интрузий. Как было показано в работах Ветлужских В.Г. с соавторами [8] и Кочеткова А.Я. [9], промышленные концентрации золота (средние содержания 2-5 г/т для штокверкового типа и 5-15 г/т для жильного) сформировались в результате контактового метасоматоза, проявленного в зонах соприкосновения мезозойских интрузий с карбонатными породами нижнего кембрия и терригенными отложениями юхтинской и дурайской свит нижней-средней юры. Рудные тела имеют жильную (серия субпараллельных жил кварц-карбонат-сульфидного состава мощностью 0,5-3 м), прожилково-вкрашенную и штокверковую форму и строго контролируются зонами разломов и трещиноватости, а также субгоризонтальными зонами дробления, широко развитыми в пределах Лебединского рудного узла. Лебединское поле контролируется пересечением Томмотского и Куранахского разломов, а Колтыконское – Якокутского и Юхтинского [8, 10].

Для руд характерен комплекс элементов-спутников, включающий сурьму, вольфрам, таллий, мышьяк и серебро. Именно в этот период сформировались промышленные концентрации золота в пределах Лебединского, Колтыконского рудных полей, которые, будучи вскрытыми эрозией, впоследствии стали источниками питания для россыпей. Важную роль в локализации оруденения сыграли также узлы магмопроявлений, представляющие собой концентрические структуры, связанные с внедрением конкретных магматических тел.

Таблица

Сводные данные по основным рудным полям и россыпям ЦАР [2, 5, 6, 8]

Table

Summary data on the main ore fields and placers of the CAD [2, 5, 6, 8]

| Объект | Тип | Основные рудные минералы | Среднее содержание Au | Контролирующие структуры |
|-------------------------|-------------------|--------------------------------|--------------------------|---------------------------------|
| Лебединское поле | Золото-сульфидный | Пирит, арсенопирит, галенит | 5-15, г/т | Томмотский, Куранахский разломы |
| Колтыконское поле | Золото-порфировый | Пирит, халькопирит, молибденит | 2-5, г/т | Якокутский, Юхтинский разломы |
| Россыпь р. Бол. Куранах | Аллювиальная | Нативное золото | 0.5-1.5 г/м ³ | Якокутская грабен-долина |

Факторы контроля золотоносности

Россыпи Центрально-Алданского района имеют аллювиальный генезис и пространственно связаны с грабен-долинами, унаследовавшими мезозойские структурные элементы. Продуктивность россыпей находится в прямой зависимости от близости к первичным источникам питания – зонам развития коренного оруденения мезозойского возраста [8, 9]. Наиболее значительные россыпи рек Якокит, Бол. Куранах и Селигдар приурочены к глубоко врезанным долинам, подвергшимся интенсивному неотектоническому погружению [1, 5]. Полученные нами данные о пространственной связи оруденения с разломами полностью согласуются с моделью, предложенной Ветлужских В.Г. с соавторами [8].

Периферийные блоки, слабо затронутые мезозойским магматизмом и неотектоническими движениями, характеризуются низкими концентрациями или полным отсутствием россыпного золота, что подтверждается материалами многолетних поисковых работ в регионе.

Формирование минерально-сырьевого потенциала района обусловлено последовательной сменой геодинамических режимов. Ключевую роль в рудообразовании сыграла мезозойская тектоно-магматическая активизация, проявившаяся в становлении узлов магмопроявлений (Томмотский, Якокутский, Лебединский) и сопряженных с ними гидротермально-метасоматических образований [3, 6], которая реализовалась в виде дискретных импульсов, создававших последовательно то тепловую аномалию и метасоматические ореолы, то поставлявших рудное вещество [12].

Пространственное распределение месторождений контролируется унаследованными разломными структурами мезозойского заложения. Крупнейшие россыпи сосредоточены в грабен-долинах, наследовавших мезозойские впадины и пространственно совмещенных с рудными полями. Неотектонический этап, выразившийся в образовании этих долин, обеспечил сохранность промышленных концентраций.

Для планирования прогнозно-поисковых работ наиболее перспективными являются зоны сочленения разломов, развития мезозойского магматизма и неотектонических грабен-долин, выполняющих функцию современных геоморфологических ловушек.

Заключение

Центрально-Алданский район представляет собой классический пример металлогенической провинции, образованной в условиях тектоно-магматической активизации. Проведенное исследование с привлечением данных классических [8-11] и новейших изотопно-геохронологических работ [12] позволило установить, что формирование золотого оруденения обусловлено не непрерывным, а дискретным многоэтапным процессом с ведущей ролью мезозойского этапа, включающего четко обособленные во времени стадии подготовки рудоподводящих систем (~160 млн лет) и собственно рудоотложения (~145-140 млн лет). Выявленные закономер-

ности пространственного распределения рудных и россыпных месторождений, включая строгий контроль оруденения узлами пересечения разломов и связь с мезозойскими интрузивными комплексами, могут служить основой для разработки усовершенствованных критериев прогнозирования золоторудных объектов. Дальнейшие исследования могут быть направлены на детальное геохимическое и изотопно-геохронологическое изучение мезозойских магматитов и сопряженного с ними оруденения, с акцентом на реконструкцию параметров рудообразующих флюидов и точной геохронологии этапов минерализации.

Литература

1. Дик И. П. Геоморфология и россыпная золотоносность Центрально-Алданского района / И. П. Дик, О. Н. Савельев. – Якутск : Якутское книжное издательство, 1970:156.
2. Дик И. П. Отчет по переоценке россыпей золота и мелких золоторудных тел Центрально-Алданского золотоносного района за 1994–1999 гг. / И. П. Дик, М. В. Каменцев, Ф. Т. Мухамедзянова. – Изв. № 481317. – Алдан, 1999:187.
3. Хомич В. Г. Структурная позиция крупных золоторудных районов Центрально-Алданского (Якутия) и Аргунского (Забайкалье) супертеррейнов / В. Г. Хомич, Н. Г. Борискина // *Геология и геофизика*. 2010; 51(6): 849–862.
4. Утробин Д. В. Отчет о результатах геологического доизучения масштаба 1:200000 и подготовки к изданию Государственной геологической карты Российской Федерации масштаба 1:200000 территории листов О-51-ХII, О-51-XVIII / Д. В. Утробин, К. А. Воробьев. – Алдан : ГУП РС (Я) «Алдангеология». 2004: 215.
5. Скороходов Н. И. Отчет о результатах поисково-разведочных работ на россыпное золото в бассейне верхних течений рек Якокит и Б. Куранах / Н. И. Скороходов. – Алдан : Тимптоно-Учурская геологоразведочная экспедиция. 1986: 187.
6. Попов С. П. Информационный отчет о результатах поисково-оценочных работ на россыпное золото в бассейнах рек Селигдар-Якокит-Алдан-Бол. Нимны, оценке техногенных и комплексных россыпей Южно-Якутского района за 2003–2006 гг. / С. П. Попов. – Алдан : ГУП РС (Я) «Алдангеология». 2005: 145.
7. Гузев В. Е. Морозкинское золоторудное месторождение (южная Якутия): возраст и источники рудного вещества / В. Е. Гузев, А. В. Терехов, Р. Ш. Крымский [и др.] // *Записки Горного института*. 2021; 252: 801–813.
8. Vetluzhskikh V.G. Central Aldan gold deposits / Vetluzhskikh V.G., Kazansky V.I., Kochetkov A.Ya., Yanovsky V.M. // *Geology of ore deposits*. 2002; 44: 405–434.
9. Кочетков А.Я., Бойцов В.Е. Мезозойская золоторудная минерализация Центрального Алдана // *Отечественная геология*. 1998;5: 15–22.
10. Бойцов В.Е., Максимов Е.П. Тектономагматическая активизация и рудообразование на Алданском щите. М.: Наука. 2000: 248.
11. Максимов Е.П. Гидротермально-метасоматические образования золоторудных месторождений Центрального Алдана // *Геология рудных месторождений*. 2005; 47(3): 243–258.
12. Гаськов И.В., Ветлужских В.Г., Наумов Е.А. и др. Условия формирования и геохронология Лебединского золоторудного месторождения (Центральный Алдан) // *Геология рудных месторождений*. 2016; 58(5): 400–418.

References

1. Dik I. P., Savelyev O.N. *Geomorphology and placer gold content of the Central Aldan region*. Yakutsk: Yakut book publishing house; 1970:156 (in Russian).
2. Dik I.P., Kamentsev M.V., Mukhamedzyanova F.T. Report on the revaluation of gold placers and small gold ore bodies in the Central Aldan gold-bearing region for 1994–1999. Aldan; 1999:187. Inv. No. 481317 (in Russian).
3. Khomich V.G., Boriskina N.G. Structural position of large gold mining areas of the Central Aldan (Yakutia) and Argun (Transbaikalia) superterraneans. *Geology and Geophysics*. 2010, Vol. 51;(6):849–862 (in Russian).

4. Utrobin D.V., Vorobyov K.A. Report on the results of geological additional study at a scale of 1:200000 and preparation for publication of the State Geological Map of the Russian Federation at a scale of 1:200000 of the territory of sheets O-51-XII, O-51-XVIII. Aldan: State Unitary Enterprise of the Republic of Sakha (Yakutia) “Aldangeology”, 2004:215 (in Russian).

5. Skorokhodov N.I. Report on the results of prospecting for placer gold in the basin of the upper reaches of the Yakokit and B. Kuranakh rivers. Aldan: Timpton-Uchur geological exploration expedition; 1986:187 (in Russian).

6. Popov S.P. Information report on the results of prospecting and assessment work for placer gold in the Seligdar-Yakokit-Aldan-Bol river basins. Nimnyr, assessment of technogenic and complex placers in the South Yakut region for 2003–2006. Aldan: State Unitary Enterprise of the Republic of Sakha (Yakutia) “Aldangeology”, 2005:145 (in Russian).

7. Guzev V. E., Terekhov A. V., Krymsky R. Sh., et al. Morozkinskoye gold deposit (southern Yakutia): age and sources of ore matter. *Journal of Mining Institute*. 2021;252:801–813 (in Russian).

8. Vetluzhskikh V.G., Kazansky V.I., Kochetkov A.Ya., et al. Central Aldan Gold Deposits. *Geology of Ore Deposits*. 2002;44:405–434.

9. Kochetkov A.Ya., Boytsov V.E. Mesozoic gold mineralization of Central Aldan. *Domestic Geology*. 1998;(5):15–22 (in Russian).

10. Boytsov V.E., Maksimov E.P. *Tectonomagmatic activation and ore formation on the Aldan shield*. Moscow: Nauka; 2000:248 (in Russian).

11. Maksimov E.P. Hydrothermal-metasomatic formations of gold ore deposits of Central Aldan. *Geology of Ore Deposits*. 2005;47(3):243–258 (in Russian).

12. Gaskov I.V., Vetluzhskikh V.G., Naumov E.A., et al. Conditions of formation and geochronology of the Lebedinskoye gold deposit (Central Aldan). *Geology of Ore Deposits*. 2016;58(5):400–418 (in Russian).

Сведения об авторах

ТРЕТЬЯКОВА Ольга Геннадьевна – ст. преп. кафедры прикладной геологии геологоразведочного факультета Северо-Восточного федерального университета им. М.К. Аммосова, SPIN-код: 7433-6792, AuthorID: 1050538

E-mail.ru: og.tretiakova@s-vfu.ru

ТРЕТЬЯКОВ Максим Феликсович – декан геологоразведочного факультета Северо-Восточного федерального университета им. М.К. Аммосова, к.г.-м.н., SPIN-код: 2675-8910, AuthorID: 717255

E-mail.ru: mf.tretiakov@s-vfu.ru

About the authors

Olga G. TRETYAKOVA – Senior Lecturer, Department of Applied Geology, Faculty of Geology and Survey, M. K. Ammosov North-Eastern Federal University, Yakutsk, Russian Federation, SPIN: 7433-6792, AuthorID: 1050538

E-mail.ru: og.tretiakova@s-vfu.ru

Maksim F. TRETYAKOV – Cand. Sci. (Geology and Mineralogy), Dean, Faculty of Geology and Survey, M. K. Ammosov North-Eastern Federal University, Yakutsk, Russian Federation, SPIN 2675-8910, AuthorID: 717255

E-mail.ru: mf.tretiakov@s-vfu.ru

Вклад авторов

Третьякова О.Г. – сбор и систематизация исходных данных (фондовые материалы, литературные источники); подготовка первоначального варианта рукописи; оформление статьи согласно требованиям журнала.

Третьяков М.Ф. – анализ и верификация геологических данных; критический анализ и доработка теоретических положений; редактирование и корректура текста; формулировка выводов и научной новизны.

Authors' contribution

Olga G. Tretyakova – collection and systematization of primary data (archival materials, literature sources); preparation of the initial manuscript draft; formatting the article according to the journal requirements.

Maksim F. Tretyakov – analysis and verification of geological data; critical analysis and refinement of theoretical positions; editing and proofreading of the text; formulation of conclusions and scientific novelty.

Конфликт интересов

Авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов. Корреспондент автор имеет право иполномочия выступать от имени всех авторов по этому исследованию

Conflict of interests

The authors declare that there is no conflict of interest. Corresponding author has the right and authority to speak on behalf of all authors on this study

Поступила в редакцию / Submitted 02.10.2025

Поступила после рецензирования / Revised 10.11.2025

Принята к публикации / Accepted 24.12.2025

ФИЗИЧЕСКАЯ ГЕОГРАФИЯ И БИОГЕОГРАФИЯ, ГЕОГРАФИЯ ПОЧВ И ГЕОХИМИЯ ЛАНДШАФТОВ

УДК 556.55(571.56-25)

<https://doi.org/10.25587/2587-8751-2025-1-66-75>

Научная оригинальная статья

ФИЗИКО-ХИМИЧЕСКИЕ ОСОБЕННОСТИ ВОДЫ АТЛАСОВСКИХ ОЗЕР г. ЯКУТСКА

Р. М. Городничев, Н. С. Кондакова, С. Н. Левина, Л. А. Пестрякова*

Северо-Восточный федеральный университет имени М. К. Аммосова,

г. Якутск, Российская Федерация

**rm.gorodnichev@s-vfu.ru*

Аннотация

На территории г. Якутска расположена сеть взаимосвязанных озер, именуемая Якутским городским каналом. Экологическое состояние водных объектов входящих в его состав ухудшалось из-за возникших в конце XX века нарушений его проточности и наполняемости, осуществляющей, главным образом, из р. Шестаковка. В последние годы связь озер города с рекой была восстановлена. Первой группой водоемов, получающих воду из р. Шестаковка, и выступающих объектом настоящего исследования, являются Атласовские озера. В ходе проведенной работы установлено, что 2 из 5 обследованных озер существуют изолированно и не сообщаются с другими водными объектами. Вода указанных озер пресная, мягкая, нейтральная и слабощелочная. Озера АТ3, АТ4 и АТ5 обмениваются водными массами и получают приток речной воды, что подтверждается схожим химическим составом их вод: сниженными минерализацией, общей жесткостью, повышенными концентрацией фосфатов, долями гидрокарбонатов и кальция. Вода указанной группы преимущественно ультрапресная, очень мягкая и мягкая, нейтральная. Атласовские озера в сопоставлении с крупнейшими водоемами г. Якутска (Сайсары, Сергелях, Хатынг-Юрях, Ытык-Кюель и Белое) обладают более низкими значениями pH воды, меньшими долями ионов натрия (в среднем на 40 %) и сульфатов (в среднем на 23 %) и большим процентным содержанием магния (в среднем на 12 %). Для воды всех исследуемых озер отмечены повышенные концентрации общего железа, что может быть связано с высокими фоновыми концентрациями данного компонента в окружающей среде и характерно для водоемов Центральной Якутии.

Ключевые слова: Атласовские озера, гидрохимия, минерализация, общая жесткость, pH, U-критерий Манна-Уитни, Якутск, формула Курлова, катионы, анионы

Финансирование. Работа выполнена в рамках Проектной части государственного задания в сфере научной деятельности Министерства науки и высшего образования РФ по теме FSRG-2023-0027 «Биота и абиотические компоненты экосистем Северо-Востока России и рациональное освоение природных ресурсов криолитозоны в условиях изменения климата и техногенного воздействия», 2023-2025 гг.

Для цитирования: Городничев Р.М., Кондакова Н.С., Левина С.Н., Пестрякова Л.А. Физико-химические особенности воды Атласовских озер г. Якутска. *Вестник СВФУ*. 2025;(4): 66-75. DOI: 10.25587/2587-8751-2025-1-66-75

PHYSICO-CHEMICAL FEATURES OF THE WATER IN THE ATLASOVSKIE LAKES OF YAKUTSK

Ruslan M. Gorodnichev*, Naliya S. Kondakova, Sardana N. Levina, Lyudmila

A. Pstryakova

North-Eastern Federal University named after M.K. Ammosova,

Yakutsk, Russian Federation

*rm.gorodnichev@s-vfu.ru

Abstract

The city of Yakutsk contains a network of interconnected lakes known as the Yakutsk City Canal. The ecological status of the water bodies within it deteriorated due to disruptions in its flow and water supply in the late 20th century, primarily from the Shestakovka River. In recent years, the connection between the city's lakes and the river has been restored. The first group of water bodies receiving water from the Shestakovka River, and the subject of this study, are the Atlasovskie Lakes. This study established that two of the five lakes surveyed are isolated and do not communicate with other water bodies. The water in these lakes is fresh, soft, neutral, and slightly alkaline. Lakes AT3, AT4, and AT5 exchange water masses and receive river water, as evidenced by the similar chemical composition of their waters: reduced mineralization, general hardness, elevated phosphate concentrations, and proportions of hydrocarbonates and calcium. The water in this group is predominantly ultra-fresh, very soft, and neutral. Compared to the largest bodies of water in Yakutsk (Saisar, Sergelyakh, Khatyng-Yuryakh, Ytyk-Kyuel, and Beloye), the Atlasovskie Lakes have lower pH values, lower sodium ion content (40 % lower on average) and sulfate content (23 % lower on average), and a higher magnesium content (12 % lower on average). Elevated total iron concentrations were observed in all studied lakes, which may be related to high background concentrations of this component in the environment and is typical of water bodies in Central Yakutia.

Keywords Atlasovskie Lakes, hydrochemistry, mineralization, total hardness, pH, Mann-Whitney U-test, Yakutsk, Kurlov formula, cations, anions

Funding. This work was completed within the framework of the Project Part of the State Assignment in the Field of Scientific Activity of the Ministry of Science and Higher Education of the Russian Federation on the topic FSRG-2023-0027 "Biota and Abiotic Components of Ecosystems of Northeastern Russia and Rational Development of Natural Resources of the Cryolithozone in the Context of Climate Change and Technogenic Impacts," 2023-2025.

For citation: Gorodnichev R.M., Kondakova N.S., Levina S.N., Pstryakova L.A. Physico-chemical features of the water in the Atlasovskie lakes of Yakutsk. *Vestnik of North-Eastern Federal University. Earth Sciences.* 2025;(4): 66-75. DOI: 10.25587/2587-8751-2025-1-66-75

Введение

На территории г. Якутска расположены десятки озер [7]. Наиболее крупные из них объединены в систему взаимосвязанных водоемов, называемую Якутский городской канал [8, 14]. Озера, входящие в его состав, получают воду из р. Шестаковка (длина около 30 км), подаваемую через искусственный водовод, организованный в юго-западной части города (на территории Автодорожного округа). Проточность Якутского городского канала в 1980–1990ые годы была нарушена, что отразилось на общем ухудшении экологического состояния озер населенного пункта. В последние годы взаимосвязь водоемов города и заполнение их водой из р. Шестаковка восстановлены, однако сведения о том, как восстановление проточности озер городского канала сказывается на качестве их воды обрывочны. Наиболее изученными водными объектами в данной области являются крупные озера канала, такие как Сайсары, Сергелях, Белое, Хатяң-Юрях и Ытык-Кюель [3, 4, 16]. К числу водоемов, характеризующихся отсутствием детальных сведений об особенностях физико-химических характеристик воды, может

быть отнесена группа компактно расположенных в юго-западной части г. Якутска старичных водоемов (рис. 1), именуемая Атласовские озера (озеро Атласовское (AT3) и близлежащие водоемы). Указанная группа водных объектов первой в составе городского канала получает воду из р. Шестаковка. Данное обстоятельство позволяет установить особенности физико-химических параметров воды, получаемой от смешения вод озер канала и питающего его водотока, что обуславливает высокую теоретическую и практическую значимость проводимого исследования. Цель работы – установить особенности основных физико-химических параметров воды Атласовских озер.



— водовод из р. Шестаковка

Рис. 1. Район исследования

Fig. 1. Study area

Материалы и методы

Пробы воды отобраны в июле 2023 г. в чистые пластиковые бутылки объемом 1-2 л с их погружением на ~0,3 м. Сбор проб осуществлен в местах наибольшей глубины озер. Координаты точек отбора получены в момент проведения полевого исследования с применением портативного GPS-навигатора. Определение pH осуществлено визуально-колориметрически с использованием тест-комплекта ПС 6.160.0-82182574-2022 [12].

Концентрация общего железа установлена с помощью тест-комплекта для визуального колориметрирования ПС 6.190-82182574-2022 [13]. Концентрации гидрокарбонатов определены титрованием [2]. Массовые концентрации ионов аммония, калия, натрия, магния, стронция, кальция, хлоридов, сульфатов, нитритов, нитратов, фторидов и фосфатов измерены на системе капиллярного электрофореза «Капель-105м» [9, 10].

Минерализация воды определена как сумма концентраций всех ионов (за исключением общего железа). Общая жесткость получена как сумма концентраций кальция и магния, выраженных в мг-экв/л.

Значимость различий физико-химических параметров воды оценена по U-критерию Манна-Уитни в компьютерной программе PAST Ver. 4.0 [18].

Картосхема построена в компьютерной программе WPS Office с использованием изображения (за июнь 2021 г.) Google Earth Pro.

Результаты и обсуждение

Вода исследуемых озер является ультрапресной (AT3 и AT5) и пресной (табл. 1). Минерализация варьирует в достаточно широких пределах. Разница между наиболее и наименее высокоминерализованной водой превышает 2,5 раза. Водородный показатель выше 7, находится в диапазоне нейтральных-слабощелочных значений и не превышает верхнего предела (8,5) норматива, установленного для водных объектов рыбохозяйственного значения. Общая жесткость воды сравниваемых озер варьирует в широких пределах (2,8 раза), однако вода объектов исследования может быть в большинстве случаев охарактеризована как мягкая.

В структуре главнейших ионов наблюдаются разнообразные сочетания долей основных катионов. Для воды озер AT2, AT3, AT4 и AT5 отмечены близкие концентрации кальция и магния. Во всех озерах высока доля натрия (не менее 24 % от суммы катионов). В воде всех объектов исследования доминирующими анионами являются гидрокарбонаты, однако озеро AT1 выделяется повышенной долей хлоридов (в 2,6–3,3 раза по сравнению с другими объектами выборки). Также в данном водоеме отмечена самая высокая абсолютная концентрация и доля ионов натрия.

Таблица 1
Основные компоненты химического состава воды озер

Table 1
Main components of the chemical composition of lake water

| Озеро | Широта, ° с.ш. | Долгота, ° в.д. | Формула Курлова | Описание состава воды |
|-------|----------------|-----------------|---|---|
| AT1 | 61°56'59.31» | 129°35'18.28» | $M0,35 \frac{HCO_3 56Cl 40}{Mg 44 Na 33 Ca 20} pH 8,0 \text{Ж}3,6$ | гидрокарбонатная, натриево-магниевая, пресная, слабощелочная, мягкая, с преобладанием гидрокарбонатов и магния. |
| AT2 | 61°57'11.71» | 129°35'26.06» | $M0,39 \frac{HCO_3 75Cl 14SO_4 11}{Mg 36 Ca 35 Na 25} pH 7,5 \text{Ж}3,5$ | гидрокарбонатная, натриево-кальциево-магниевая, пресная, нейтральная, мягкая, с преобладанием гидрокарбонатов и магния. |

| | | | | |
|-----|--------------|---------------|---|--|
| AT3 | 61°57'54.44» | 129°37'3.92» | $M0,15 \frac{HCO_3 83Cl14}{Ca36Mg35Na26} pH7,5Ж1,3$ | гидрокарбонатная, натриево-магниево-кальциевая, ультрапресная, нейтральная, очень мягкая, с преобладанием гидрокарбонатов и кальция. |
| AT4 | 61°58'27.67» | 129°37'21.36» | $M0,2 \frac{HCO_3 82Cl15}{Ca36Mg35Na27} pH7,5Ж1,8$ | гидрокарбонатная, натриево-магниево-кальциевая, пресная, нейтральная, мягкая, с преобладанием гидрокарбонатов и кальция. |
| AT5 | 61°58'50.04» | 129°37'25.48» | $M0,15 \frac{HCO_3 84Cl12}{Ca40Mg34Na24} pH7,5Ж1,6$ | гидрокарбонатная, магниево-кальциевая, ультрапресная, нейтральная, мягкая, с преобладанием гидрокарбонатов и кальция. |

Примечание: М – минерализация воды (г/л), Ж – общая жесткость (мг-экв/л).

Концентрации исследуемых ионов и общего железа (табл. 2) были сопоставлены с нормативами предельно-допустимых концентраций, установленных для водных объектов рыбохозяйственного значения [11].

Таблица 2
Ионный состав воды озер

Table 2

Ionic composition of lake water

| Озеро | Железо общее, мг/л | Аммоний, мг/л | Калий, мг/л | Натрий, мг/л | Магний, мг/л | Стронций, мг/л | Кальций, мг/л | Хлориды, мг/л | Нитриты, мг/л | Сульфаты, мг/л | Нитраты, мг/л | Фториды, мг/л | Фосфаты, мг/л | Гидрокарбонаты, мг/л |
|----------------|--------------------|---------------|-------------|--------------|--------------|----------------|---------------|---------------|---------------|----------------|---------------|---------------|---------------|----------------------|
| AT1 | 0,1 | <0,5 | 7,86 | 42,2 | 30,2 | 0,25 | 22,1 | 57,2 | <0,2 | 8,19 | <0,2 | <0,1 | <0,25 | 140,3 |
| AT2 | 0,1 | <0,5 | 5,41 | 28,4 | 21,5 | <0,25 | 34,4 | 26,6 | <0,2 | 28,58 | <0,2 | <0,1 | <0,25 | 244,0 |
| AT3 | 0,1 | <0,5 | 2,24 | 11 | 7,9 | <0,25 | 13,1 | 9,7 | <0,2 | 2,63 | 1,51 | 0,10 | 0,26 | 97,6 |
| AT4 | 0,7 | <0,5 | 2,13 | 15,4 | 10,8 | <0,25 | 17,9 | 13,9 | <0,2 | 3,93 | 2,29 | 0,11 | 0,48 | 134,2 |
| AT5 | 0,3 | <0,5 | 1,86 | 11,9 | 8,9 | <0,25 | 17,2 | 7,9 | <0,2 | 4,09 | 2,26 | 0,10 | 0,30 | 97,6 |
| ПДК рыбхоз. | 0,1 | 0,5 | 50 | 120 | 40 | 0,4 | 180 | 300 | 0,08 | 300 | 40 | 0,75 | 0,46 | |

Для воды всех исследуемых озер отмечены высокие концентрации общего железа (1–7 ПДК). В озерах AT4 и AT5 установлены превышения норматива в 7 и 3 раза соответственно. Отмеченные повышенные концентрации показателя являются типичными для озер территории г. Якутска и Центральной Якутии [14, 15], в том числе отмечены для водных объектов, не испытывающих непосредственного антропогенного воздействия [1, 19], и могут быть связаны с высокими фоновыми концентрациями компонента в окружающей среде и попаданием в воду гумифицированных растворенных органических веществ, образующих комплексы с железом [5].

В воде озер AT3, AT4 и AT5 зафиксированы высокие концентрации фосфатов, превышающие ПДК для олигосапробных водоемов (0,15 мг/л) в 1,7–3,3 раза. В озере AT4 концентрация фосфатов превышает установленный лимит (на 0,02 мг/л) для воды мезотрофных водных объектов. Основным источником поступления фосфатов на территории г. Якутска выступает поверхностный сток, обогащенный фосфатами, вероятно, поступающими в окружающую среду в результате аварийных ситуаций и протечек системы отведения коммунальных вод города [6].

В воде озер AT3, AT4 и AT5 зафиксировано некоторое количество нитратов, концентрации которых существенно ниже предельно-допустимых и могут быть следствием протекания в озере естественных процессов, связанных с разложением органических веществ.

В воде озера AT1 отмечено присутствие стронция в концентрациях выше пределов обнаружения используемого лабораторного оборудования. Поступление стронция в озера города в значительной степени может быть обусловлено атмосферными осадками, содержащими данный компонент [17].

Вода озер AT3, AT4 и AT5 характеризуется близкими значениями большинства физико-химических параметров, что подтверждает существующую между их котловинами связь и обмен водными массами.

Получая воды р. Шестаковка, данные озера приобретают схожие с питающим их водотоком гидрохимические особенности: ультрапресную или близкую ультрапресной мягкую воду с высокой долей кальция и магния [5]. Значения гидрохимических параметров озер AT1 и AT2, расположенных юго-западнее, демонстрируют отсутствие связи между ними и изолированность от остальных Атласовских озер в момент исследования. В частности, на это указывает повышенные минерализация, общая жесткость, соотношение катионов и анионов.

Произведено сравнение величин физико-химических параметров воды обследованных озер с усредненными за многие годы значениями аналогичных характеристик наиболее крупных водоемов г. Якутска (Сайсары, Сергелях, Хатынг-Юрях, Ытык-Кюель и Белое), входящих в состав Якутского городского канала [4]. Атласовские озера статистически значимо (при $p < 0,05$) не отличаются от наиболее крупных озер города по значениям минерализации, общей жесткости, долям гидрокарбонатов, хлоридов и кальция (табл. 3). Существенные отличия при заданном уровне значимости озер исследуемого района от наиболее крупных водоемов города установлены по водородному показателю, долям сульфатов, магния и натрия. В целом, вода обследованных объектов обладает схожими для озер города минерализацией и общей жесткостью, более низкими значениями pH (близкими к нейтральным), характеризуется существенно меньшими долями натрия (в среднем на 40 %) и сульфатов (в среднем на 23 %) и большей долей магния (в среднем на 12 %). Стоит отметить, что значения физико-химических параметров воды озер г. Якутска подвержены времененным изменениям и находятся в прямой зависимости от вод их питающих, в том числе от паводковой ситуации на р. Лене, поэтому проведенное сравнение может не в полной мере отражать существующее на момент исследования положение дел.

Таблица 3

Значимость различий физико-химических параметров воды исследуемых озер и наиболее крупных водоемов г. Якутска [4]

Table 3

Significance of differences in the physicochemical parameters of water in the studied lakes and the largest reservoirs in Yakutsk [4]

| Параметр | U-критерий Манна-Уитни | Результат (при $p < 0,05$) | Результат (при $p < 0,1$) |
|---------------------|---------------------------|--------------------------------|-------------------------------|
| pH | 2 | различия значимы | различия значимы |
| Минерализация, мг/л | 3 | различия не значимы | различия значимы |

| | | | |
|---------------------------|---|-------------------------|-------------------------|
| Общая жесткость, мг-экв/л | 3 | различия не значимы | различия значимы |
| HCO_3^- , % | 6 | различия не значимы | различия не значимы |
| Cl^- , % | 5 | различия не значимы | различия не значимы |
| SO_4^{2-} , % | 0 | различия значимы | различия значимы |
| Ca^{2+} , % | 3 | различия не значимы | различия значимы |
| Mg^{2+} , % | 2 | различия значимы | различия значимы |
| Na^+ , % | 0 | различия значимы | различия значимы |

Заключение

В июле 2023 года определены физико-химические параметры воды в Атласовских озерах. Их значения значительно варьировались, что можно объяснить отсутствием или наличием сообщения между котловинами озер, а также притоком воды из реки Шестаковка. Озера АТ1 и АТ2 не имели связи с остальными исследуемыми водоемами и не получали заметного притока речных вод. Вода в этих озерах отличалась относительно высотой минерализацией и общей жесткостью, а также преобладанием магния и уменьшением доли гидрокарбонатов в ионном составе. Вода в озерах АТ3, АТ4 и АТ5 была ультрапресной и пресной, очень мягкой или мягкой, нейтральной. В отличие от озер АТ1 и АТ2, эти водоемы характеризовались относительно низкой минерализацией и общей жесткостью. В их ионном составе преобладали гидрокарбонаты и кальций, а концентрации фосфатов были выше. Вода ультрапресная и пресная, очень мягкая и мягкая, нейтральная. Котловины озер АТ3, АТ4 и АТ5 были связаны между собой и получали воду из реки Шестаковка, что способствовало формированию единого водного пространства.

Атласовские озера в сопоставлении с наиболее крупными водоемами г. Якутска обладают более низкими значениями pH воды, характеризующейся существенно меньшими долями в структуре главных ионов натрия (в среднем на 40 %) и сульфатов (в среднем на 23 %) и большим процентным содержанием магния (в среднем на 12 %). Для воды всех исследуемых озер отмечены повышенные концентрации общего железа, что является типичной особенностью озер Центральной Якутии и связано с высокими фоновыми концентрациями данного компонента в окружающей среде.

Литература

- Городничев Р. М. Взаимосвязь состава диатомовых комплексов, морфометрических и гидрохимических характеристик озерных экосистем Севера Якутии: дис. ... канд. биол. наук: 03.02.08 / Городничев Руслан Михайлович. Якутск. 2015. 187 с.
- ГОСТ Р 52963-2008. Вода. Методы определения щелочности и массовой концентрации карбонатов и гидрокарбонатов. Введ. 2010-01-01. М.: Стандартинформ. 2008: 26.
- Ксенофонтова М.И., Легостаева Я.Б., Ябловская П.Е., Трофимова Л.Н. Характеристика химического состава вод и донных отложений крупных водоемов г. Якутска // Актуальные проблемы гуманитарных и естественных наук. 2013; 4. URL: <https://cyberleninka.ru/article/n/harakteristika-himicheskogo-sostava-vod-i-donnnyh-otlozheniy-kuprnyh-vodoemov-g-yakutska/viewer> (дата обращения: 30.11.2024).
- Легостаева Я.Б., Руфова А.А. Анализ гидрохимического режима наиболее крупных озер города Якутска // Природные ресурсы Арктики и Субарктики. 2022; 27(4): 572-591.
- Луценко Т.Н., Шамов В.В., Ксенофонтова М.И., Лебедева Л.С. Растворенное органическое вещество в природных водах типичного речного бассейна Центральной Якутии // Третья Виноградовские чтения. Границы гидрологии: Сборник докладов МНК памяти выдающегося русского гидролога Ю.Б. Виноградова. Под редакцией О.М. Макарьевой. СПб: Наукоемкие технологии. 2018; 80-85.
- Макаров В.Н. Источники поступления фосфатов в городские озера // Научный альманах. 2019; 12-3 (62): 149-152.
- Макаров В.Н., Чижук А.Л. Поступление фосфатов в озера Якутска // Наука и образование. 2009; 4: 66-69.

8. Николаев А.А., Архипов И.В. Экологическое состояние озер города Якутска для туристско-рекреационного использования // *Успехи современного естествознания*. 2021;11:106-113.
9. ПНД Ф 14.1:2:4.157-99. Количественный химический анализ вод. Методика выполнения измерений массовых концентраций хлорид-ионов, нитрит-ионов, сульфат-ионов, нитрат-ионов, фторид-ионов и фосфат-ионов в пробах природных, питьевых и очищенных сточных вод с применением системы капиллярного электрофореза «КАПЕЛЬ». Введ. 2013-10-24. М.: ООО «Люмэкс-маркетинг». 2013: 44.
10. ПНД Ф 14.1:2:4.167-2000. Количественный химический анализ вод. Методика измерений массовой концентрации катионов аммония, калия, натрия, лития, магния, стронция, бария и кальция в пробах питьевых, природных (в том числе минеральных) и сточных вод методом капиллярного электрофореза с использованием системы капиллярного электрофореза «КАПЕЛЬ». Введ. 2011-11-28. М.: ООО «Люмэкс-маркетинг». 2011:35.
11. Приказ Росрыболовства РФ № 296. Об утверждении нормативов качества воды водных объектов рыбохозяйственного значения, в том числе нормативов предельно допустимых концентраций загрязняющих веществ в водах водных объектов рыбохозяйственного значения. Введ. 2025-05-26. URL: https://www.consultant.ru/document/cons_doc_LAW_506962/. (дата обращения: 16.09.2025).
12. ПС 6.160.0-82182574-2022. Тест-комплект «рН». СПб: ЗАО «Крисмас+». 2022: 2.
13. ПС 6.190-82182574-2022. Тест-комплект «Железо общее». СПб: ЗАО «Крисмас+». 2022:18.
14. Руфова А.А., Ксенофонтова М.И. Гидрохимический состав как один из индикаторов современных условий формирования озер (на примере г. Якутска) // *Наука и образование*. 2015; 2: 145-151.
15. Руфова А.А., Ксенофонтова М.И., Ябловская П.Е. Оценка содержания биогенных элементов в водах озер г. Якутска // *Международный журнал прикладных и фундаментальных исследований*. 2013; 8: 75-77.
16. Седельникова А.Л., Макаров В.Н. Влияние атмосферных осадков на геохимию озерных систем г. Якутска // *Наука и образование*. 2016; 1: 47-51.
17. Седельникова А.Л., Макаров В.Н. Стронций в воде городских озер // *Геология и минерально-сырьевые ресурсы Северо-Востока России [Электронный ресурс]*: материалы XII Всероссийской ППК, посвященной 65-летию Института геологии алмаза и благородных металлов Сибирского отделения РАН, 23-25 марта 2022 г. / [Отв. ред. В.Ю. Фридовский]. Якутск: Издательский дом СВФУ. 2022; 474-478.
18. Hammer Ø., Harper D.A.T., Ryan P. D. PAST: Paleontological Statistics Software Package for Education and Data Analysis // *Palaeontologia Electronica*. 2001; 4(1): 9.
19. Pestryakova L.A., Herzschuh U., Wetterich S., Ulrich M. Present-day variability and Holocene dynamics of permafrost-affected lakes in central Yakutia (Eastern Siberia) // *Quaternary Science Reviews*. 2012; 51:56-70.

References

1. Gorodnichev R.M. Interrelation of diatom assemblages, morphometric and hydrochemical characteristics of lakes in Northern Yakutia: Candidate's dissertation (Biology). Yakutsk; 2015:187 (in Russian).
2. GOST R 52963-2008. Water. Methods for determining alkalinity and the mass concentration of carbonates and bicarbonates. Moscow: Standartinform; 2008: 26 (in Russian).
3. Ksenofontova M.I., Legostaeva Ya.B., Yablovskaya P.E., Trofimova L.N. Characteristics of the chemical composition of water and bottom sediments of large water bodies in Yakutsk. *Actual Problems of Humanities and Natural Sciences*. 2013;(4). Available at: <https://cyberleninka.ru/article/n/harakteristika-himicheskogo-sostavavod-i-donnyh-otlozheniy-krupnyh-vodoemov-g-yakutskaya/viewer> (accessed: 30 November 2024) (in Russian).
4. Legostaeva Y.B., Rufova A.A. Analysis of the hydrochemical regime of the largest lakes in Yakutsk. *Resources of the Arctic and Subarctic*. 2022;27(4):572–591 (in Russian).
5. Lutsenko T.N., Shams V.V., Ksenofontova M.I., Lebedeva L.S. Dissolved organic matter in natural waters of the typical river basin of Central Yakutia. In: *Third Vinogradov Readings. Aspects of Hydrology: Collection of Reports of the International Scientific Conference in Memory of the Renowned Russian Hydrologist Yu.B. Vinogradov*. St. Petersburg: Science and Technology; 2018:80–85 (in Russian).
6. Makarov V.N. Sources of phosphate input into city lakes. *Scientific Herald*. 2019;12–3(62):149–152 (in Russian).
7. Makarov V.N., Chizhuk A.L. Phosphate input into Yakutsk lakes. *Science and Education*. 2009;(4):66–69 (in Russian).

8. Nikolaev A.A., Arkhipov I.V. Ecological state of city lakes for tourist and recreational use. *Achievements of Modern Natural Science*. 2021;(11):106–113 (in Russian).
9. PND F 14.1:2:4.157-99. Quantitative chemical analysis of water. Method for measuring the mass concentrations of chloride ions, nitrite ions, sulfate ions, nitrate ions, fluoride ions, and phosphate ions in samples of natural, drinking, and treated wastewater using the capillary electrophoresis system “KAREL”. Implemented 2013-10-24. Moscow: Lyumeks-market; 2013:44 (in Russian).
10. PND F 14.1:2:4.167-2000. Quantitative chemical analysis of water. Method for measuring the mass concentration of ammonium, potassium, sodium, lithium, magnesium, strontium, barium, and calcium cations in samples of drinking, natural (including mineral), and wastewater by capillary electrophoresis using the KAREL system. Implemented 2011-11-28. Moscow: Lyumeks-market; 2011:35 (in Russian).
11. Order of the Federal Fishery Agency of Russia No. 296. Approval of water quality standards for water bodies of fishery significance, including maximum permissible concentrations (MPCs) of pollutants in water bodies of fishery importance. Effective 2025-05-26. Available at: https://www.consultant.ru/document/cons_doc_LAW_506962/ (accessed: 16 September 2025) (in Russian).
12. pH Test Kit. St. Petersburg: Krismas+; 2022:2 (in Russian).
13. Iron Total Test Kit. St. Petersburg: Krismas+; 2022:18 (in Russian).
14. Rufova A.A., Ksenofontova M.I. Hydrochemical composition as an indicator of the modern conditions shaping lakes: the case of Yakutsk. *Science and Education*. 2015;(2):145–151 (in Russian).
15. Rufova A.A., Ksenofontova M.I., Yablovskaya P.E. Assessment of biogenic element content in water of lakes in Yakutsk. *International Journal of Applied and Fundamental Research (2011-2019)*. 2013;(8):75-77 (in Russian).
16. Sedelnikova A.L., Makarov V.N. Influence of atmospheric precipitation on the geochemistry of lakes in Yakutsk. *Science and Education*. 2016;(1):47–51 (in Russian).
17. Sedelnikova A.L., Makarov V.N. Strontium in city lake water. In: Fridovskiy V.Yu. (ed). *Geology and Mineral Resources of Northeast Russia: Proceedings of the XII All-Russian Conference, dedicated to the 65th anniversary of the Institute of Diamond Geology and Precious Metals of the Siberian Branch of the Russian Academy of Sciences*, March 23–25, 2022. Yakutsk: SFAU Publishing House; 2022:474–478 (in Russian).
18. Hammer Ø., Harper D.A.T., Ryan P. D. PAST: Paleontological Statistics Software Package for Education and Data Analysis. *Palaeontologia Electronica*. 2001;4(1):9.
19. Pestryakova L.A., Herzschuh U., Wetterich S., Ulrich M. Present-day variability and Holocene dynamics of permafrost-affected lakes in central Yakutia (Eastern Siberia). *Quaternary Science Reviews*. 2012;51:56–70.

Об авторах

ГОРОДНИЧЕВ Руслан Михайлович – к.б.н., зав. лабораторией БиоМ, ИЕН СВФУ им. М.К. Аммосова, ORCID: 0000-0002-1941-5383, ResearcherID: AAP-2354-2020, Scopus Author ID: 55836031600, SPIN: 7728-0784

Е-mail: rm.gorodnichev@s-vfu.ru

КОНДАКОВА Налия Сергеевна – студент 2 курса группы М-ГЕО-24 ИЕН СВФУ им. М.К. Аммосова

Е-mail: naliya2001@mail.ru

ЛЕВИНА Сардана Николаевна – к.г.н., с.н.с. лаборатории БиоМ, ИЕН СВФУ им. М.К. Аммосова, ORCID: 0000-0002-7653-7379, ResearcherID: AEI-2272-2022, Scopus Author ID: 55 58316520900, SPIN: 7361-2912

Е-mail: levina_sardan@mail.ru

ПЕСТРЯКОВА Людмила Агафьевна – д.г.н., г.н.с. ИЕН СВФУ им. М.К. Аммосова, ORCID: 0000-0001-5347-4478, ResearcherID: Q-9900-2016, Scopus Author ID: 18434936500, SPIN: 8323-7283

Е-mail: lapest@mail.ru

About the authors

Ruslan M. GORODNICHEV – Cand. Sci. (Biology), Head of the BioM laboratory, Institute of Natural Sciences, M. K. Ammosov North-Eastern Federal University, Yakutsk, Russian Federation, ORCID: 0000-0002-1941-5383, ResearcherID: AAP-2354-2020, Scopus Author ID: 55836031600, SPIN: 7728-0784

E-mail: rm.gorodnichev@s-vfu.ru

Naliya S. KONDAKOVA – 2nd-year student, Institute of Natural Sciences, M. K. Ammosov North-Eastern Federal University, Yakutsk, Russian Federation

E-mail: naliya2001@mail.ru

Sardana N. LEVINA – Cand. Sci. (Geography), Senior Researcher, BioM laboratory, Institute of Natural Sciences, M. K. Ammosov North-Eastern Federal University, Yakutsk, Russian Federation, ORCID: 0000-0002-7653-7379, ResearcherID: AEI-2272-2022, Scopus Author ID: 55 58316520900, SPIN: 7361-2912

E-mail: levina_sardan@mail.ru

Lyudmila A. PESTRYAKOVA – Dr. Sci. (Geography), Chief Researcher, Institute of Natural Sciences, M. K. Ammosov North-Eastern Federal University, Yakutsk, Russian Federation, ORCID: 0000-0001-5347-4478, ResearcherID: Q-9900-2016, Scopus Author ID: 18434936500, SPIN: 8323-7283

E-mail: lapest@mail.ru

Вклад авторов

Все авторы внесли эквивалентный вклад в подготовку публикации

Authors' contribution

All authors made equivalent contributions to the publication.

Конфликт интересов

Левина Сардана Николаевна является выпускающим редактором журнала Вестник Северо-Восточного федерального университета имени М.К. Аммосова. Серия “Науки о Земле”

Conflict of interests

Levina Sardana Nikolaevna is the editor-in-chief of Vestnik of North-Eastern Federal University. Earth Sciences Series.

Поступила в редакцию / Submitted 17.11.2025

Поступила после рецензирования / Revised 12.12.2025

Принята к публикации / Accepted 24.12.2025

МОНИТОРИНГ КАЧЕСТВА АТМОСФЕРНОГО ВОЗДУХА ТЕРРИТОРИИ ЧАЯНДИНСКОГО НЕФТЕГАЗОКОНДЕНСАТНОГО МЕСТОРОЖДЕНИЯ

А.В. Махорин¹, О.В. Агамедова¹, М.В. Бульгинов¹, О.В. Цыденова¹, И.В. Ядрихинский^{2}*

¹ ООО “Газпром добыча Ноябрьск”, г. Ноябрьск, Российская Федерация

² Северо-восточный федеральный университет имени М.К. Аммосова,
г. Якутск, Российская Федерация

*yadroid@mail.ru

Аннотация

Исследование приобретает особую актуальность в связи с растущим воздействием человека на экосистемы Арктики и Субарктики, вызванным активным освоением нефтегазовых месторождений. Одним из крупнейших и стратегически значимых объектов в системе газопровода «Сила Сибири» является Чаяндинское нефтегазоконденсатное месторождение (НГКМ), расположенное в Республике Саха (Якутия). Эксплуатация любого месторождения на разных этапах разработки сопровождается выбросами загрязняющих веществ, таких как диоксид серы (SO_2), оксиды азота (NO_x), метан (CH_4) и оксид углерода (CO). Этот факт требует постоянного мониторинга и анализа для минимизации экологических рисков в регионе. Цель работы – провести комплексный анализ состояния атмосферного воздуха на Чаяндинском лицензионном участке в период с 2021 по 2023 год. Для этого были использованы данные производственного экологического мониторинга (ПЭМ). Методы исследования: инструментальные измерения концентраций загрязняющих веществ, статистическая обработка данных, картографический анализ пространственного распределения загрязнений и оценка метеорологических параметров. Результаты показали, что в целом качество атмосферного воздуха на территории месторождения соответствует нормативным требованиям, при этом в период обустройства были зафиксированы локальные превышения предельно допустимых концентраций. Практическая ценность работы заключается в разработке рекомендаций по сокращению выбросов, включающих модернизацию очистных систем, оптимизацию транспортных потоков, мониторинг утечек метана и предложения по проектированию обустройства месторождений. Реализация указанных мер, по мнению авторов, приведет к снижению загрязнения на 30–40 %. Данные настоящей статьи могут быть использованы при проектировании и совершенствовании экологического контроля на промышленных объектах Крайнего Севера.

Ключевые слова: атмосферный воздух, экологический мониторинг, загрязняющие вещества, предельно допустимые концентрации (ПДК), Чаяндинское месторождение, нефтегазовый комплекс, диоксид серы (SO_2), оксиды азота (NO_x), метан (CH_4)

Для цитирования: Махорин А.В., Агамедова О.В., Бульгинов М.В., Цыденова О.В., Ядрихинский И.В. Мониторинг качества атмосферного воздуха территории Чаяндинского нефтегазоконденсатного месторождения. *Вестник СВФУ*. 2025;(4): 76-85. DOI: 10.25587/2587-8751-2025-1-76-85

MONITORING OF ATMOSPHERIC AIR QUALITY IN THE TERRITORY OF THE CHAYANDA OIL AND GAS CONDENSATE FIELD

Andrey V. Makhorin¹, Oksana V. Agamedova¹, Maxim V. Bultinov¹,

Olga V. Tsydenova¹, Ivan V. Yadrikhinsky^{2*}

¹ Gazprom dobycha Noyabrsk LLC, Noyabrsk, Russia

² M. K. Ammosov North-Eastern Federal University, Yakutsk, Russian Federation

*yadroid@mail.ru

Abstract

The study is becoming particularly relevant due to the growing human impact on the ecosystems of the Arctic and Subarctic caused by the intensive development of oil and gas fields. One of the largest and significant facilities in the Power of Siberia gas pipeline is the Chayanda oil and gas condensate field located in Yakutia. The operation of any field at different stages of development is accompanied by emissions of sulfur dioxide, nitrogen oxides, methane and carbon monoxide. This fact requires constant monitoring and analysis to minimize environmental risks in the region. The purpose of the work is to conduct a comprehensive analysis of the air condition at the Chayanda license area in 2021–2023. For this purpose, data from industrial environmental monitoring was used. Research methods: instrumental measurements, statistical data processing, cartographic analysis of the spatial distribution of pollutants and assessment of meteorological parameters. The results showed that, in general, the quality of atmospheric air in the field meets regulatory requirements, while local exceedances of the maximum permissible concentrations were recorded during the development period. The practical value of the work lies in the development of recommendations for reducing emissions, including the modernization of treatment systems, optimization of traffic flows, monitoring of methane leaks and proposals for the design of field development. The implementation of these measures will lead to a reduction in pollution by 30–40 %. The data in this article can be used in the design and improvement of environmental control at industrial facilities in the Far North.

Keywords: atmospheric air, environmental monitoring, pollutants, maximum permissible concentrations (MPC), Chayanda field, oil and gas industry, sulfur dioxide (SO_2), nitrogen oxides (NO_x), methane (CH_4)

For citation: Makhorin A.V., Agamedova O.V., Bultinov M.V., Tsydenova O.V., Yadrikhinsky I.V. Monitoring of atmospheric air quality in the territory of the Chayanda oil and gas condensate field. *Vestnik of North-Eastern Federal University. Earth Sciences*. 2025;(4): 76-85. DOI: 10.25587/2587-8751-2025-1-76-85

Введение

Атмосферный воздух является неотъемлемой частью окружающей среды, и его качество непосредственно влияет на здоровье людей и устойчивость экосистем [1]. Чаяндинское нефтегазоконденсатное месторождение (НГКМ) (рис. 1), расположенное в Республике Саха (Якутия), представляет собой крупный объект промышленного освоения, эксплуатация которого сопровождается выбросами загрязняющих веществ в результате деятельности множества различных организаций.

Актуальность исследования заключается в необходимости комплексного анализа данных производственного экологического мониторинга, проведенного в период с 2021 по 2023 годы. Такой анализ позволит выявить тенденции и разработать эффективные меры, направленные на снижение негативного воздействия на окружающую среду.

В научной литературе по оценке качества атмосферного воздуха района исследования нет данных. Лишь найдены публикации о перспективах освоения разведанных запасов углеводородов, а также о проекте внедрения новых технологий Чаяндинского месторождения (2-5) Обзор научной литературы показывает, что промышленные выбросы в северных регионах имеют свои уникальные особенности. Низкие температуры и слабый ветер способствуют накоплению загрязняющих веществ в приземном слое атмосферы. При этом существующие методы мониторинга часто требуют адаптации к сложным климатическим условиям Крайнего Севера [6].

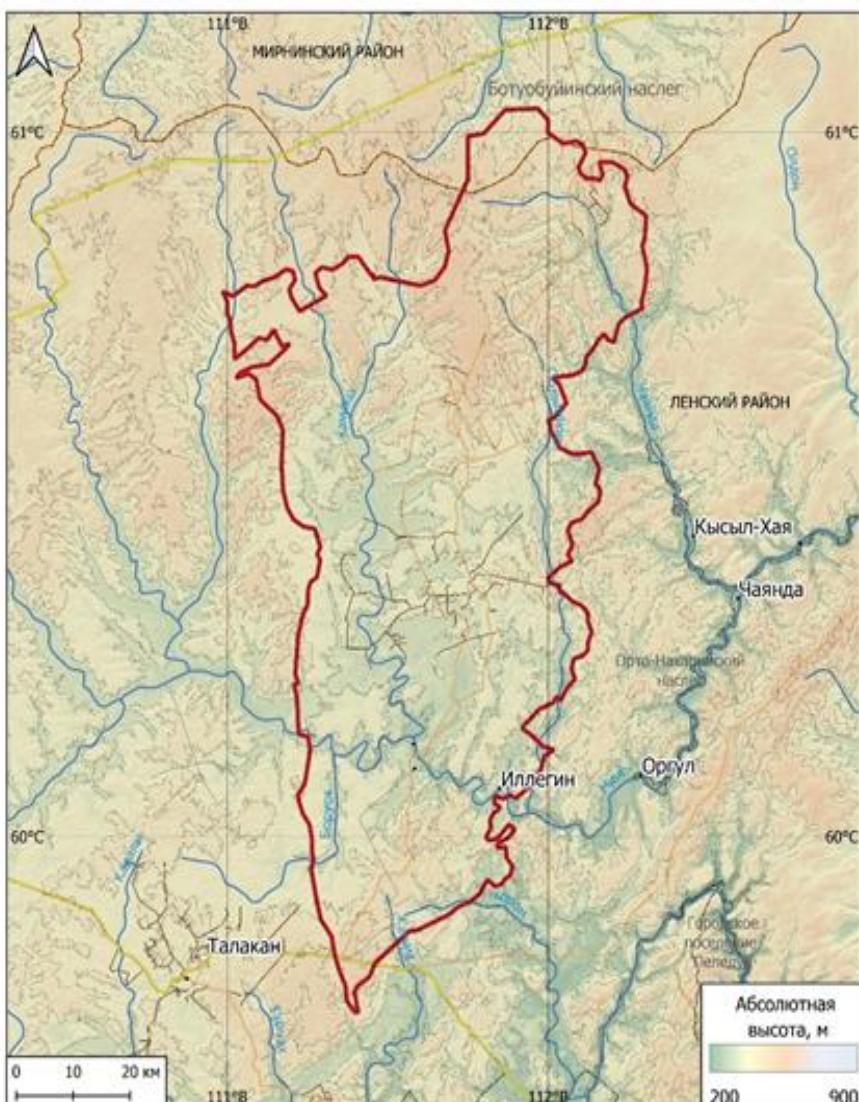


Рис. 1. Картосхема расположения Чаяндинского НГКМ

Fig. 1. Map of the location of the Chayanda OGCF

Главная цель исследования – оценить влияние промышленности на качество атмосферного воздуха в условиях резко континентального климата. В районе исследования в зимний период температуры могут опускаться до -55°C , а ветры дуют слабо – со скоростью 0,8-2,4 м/с, что значительно затрудняет естественное рассеивание загрязняющих веществ. Кроме того, в это время года активизируется работа дизельных электростанций, приводящих к увеличению выбросов диоксида серы и керосина.

В рамках данного исследования был проведен анализ состояния атмосферного воздуха на Чаяндинском месторождении за трехлетний период с 2021 по 2023 год, сформулированы научно обоснованные рекомендации по оптимизации природоохранных мероприятий. В ходе исследования выполнен анализ пространственно-временного распределения основных загрязняющих веществ, выявлены ключевые источники выбросов, проведен анализ влияния климатических факторов и сформулированы предложения по снижению антропогенной нагрузки на окружающую среду [7].

Материалы и методы исследования

Исследование основано на результатах производственного экологического мониторинга, проводившегося в течение трех лет на десяти стационарных станциях ООО «Газпром добыча Ноябрьск». Для точного измерения концентраций загрязняющих веществ использовался современный газоанализатор ГАНК-4. Этот прибор позволяет с высокой точностью определять содержание диоксида серы, оксидов азота, оксида углерода и метана в атмосферном воздухе. Для отбора проб взвешенных частиц применялись аспираторы ПА-300М и ПУ-4Э.

В процессе мониторинга контролировались следующие показатели: диоксид азота (NO_2), оксид азота (NO), метан (CH_4), оксид углерода (CO), диоксид серы (SO_2), керосин, взвешенные частицы, бенз(а)пирен, пыль и углеводороды. В данной работе приведен анализ данных производственного экологического мониторинга, проведенного в период с 2021 по 2023 годы на пяти (AB 1-5) стационарных станциях ЧНГКМ (рис. 2).

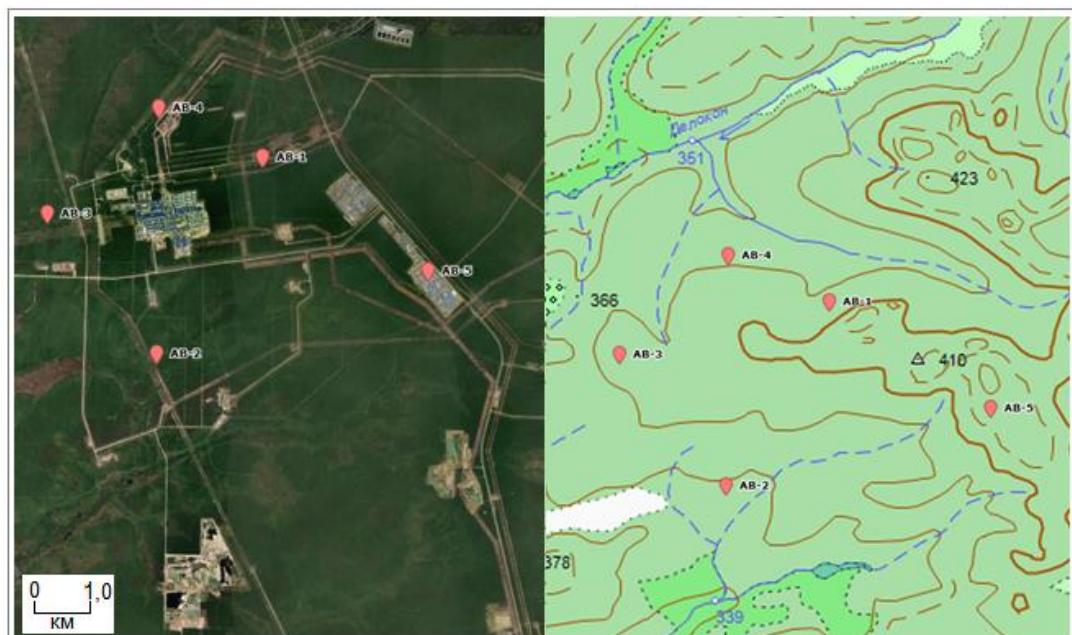


Рис. 2. Картосхема расположения стационарных станций по точкам отбора Чаяндинского НГКМ

Fig. 2. Map of the location of stationary stations at the sampling points of the Chayanda OGCF

Результаты

В ходе исследований была обнаружена значительная изменчивость концентраций загрязняющих веществ как во времени, так и в пространстве. На представленных диаграммах (рис. 3-4) отображена динамика веществ, концентрации которых превышали 70 % от ПДК. Такой способ визуализации данных был выбран в связи с тем, что остальные контролируемые показатели оставались на стабильно низком уровне и не приближались к опасным значениям. Это позволяет сконцентрировать внимание на наиболее значимых с точки зрения экологического риска веществах и выявить потенциально проблемные участки. Ниже приведена характеристика изменения концентраций загрязняющих веществ, превышающих хотя бы единожды 70 % ПДК.

Уровень диоксида серы (SO_2) в большинстве случаев не превышал допустимую концентрацию ($0,5 \text{ мг}/\text{м}^3$), но 29 марта 2021 года на станции AB-1 было зафиксировано значительное повышение ($2,052 \text{ мг}/\text{м}^3$), составляющее 410 % от ПДК. Причиной такого резкого скачка могли стать выбросы от промышленных предприятий, использующих сернистое топливо, а также проведение пуско-наладочных работ на объектах инфраструктуры месторождения.

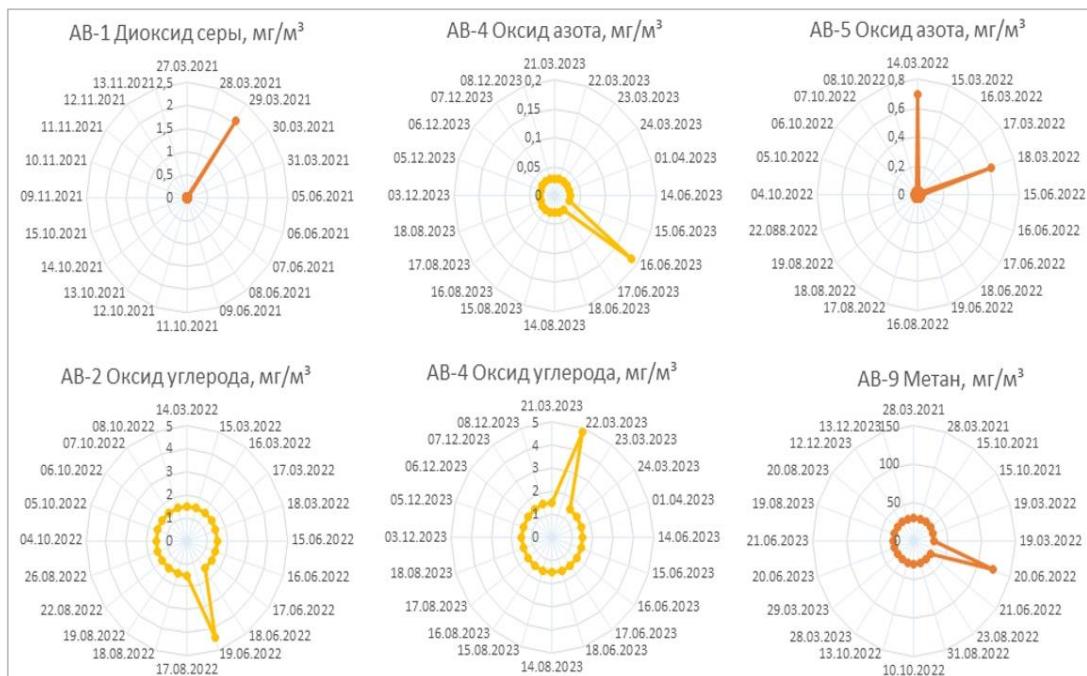


Рис. 3. Случаи повышения концентраций в атмосферном воздухе загрязняющих веществ
Fig. 3. Cases of increased concentrations of pollutants in atmospheric air

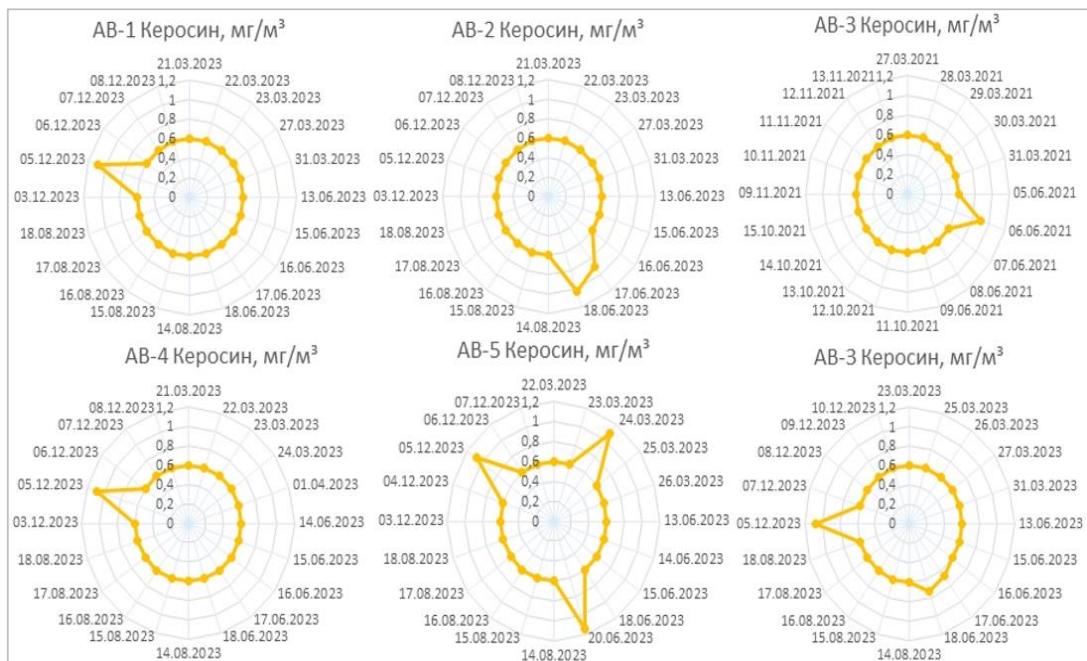


Рис. 4. Случаи повышения концентрации керосина
Fig. 4. Cases of increased kerosene concentration

На станции АВ-5 в 2022 году было зарегистрировано два превышения ПДК по NO: 0,7 мг/м³ и 0,61 мг/м³, при норме 0,2 мг/м³. Вероятно, повышенные концентрации оксида азота связаны с интенсивным движением грузового транспорта в непосредственной близости от станции. Концентрации оксида азота на станции АВ-4 в течение периода наблюдений оставалась

в пределах допустимых значений. Максимальный уровень, зафиксированный 16 июня 2023 года, составил 94 % от ПДК и достиг значения 0,188 мг/м³. Такое повышение концентрации вероятно было вызвано увеличенной нагрузкой на системы отопления и ухудшением условий рассеивания загрязняющих веществ в атмосфере.

Уровень концентрации угарного газа (СО) в атмосферном воздухе Чаяндинского месторождения в период 2021–2023 гг. оставался в пределах нормы – 5 мг/м³. Однако на станции АВ-2 19 июня 2022 года и 18 июня 2023 года были зафиксированы значения 4,46 мг/м³ (89 % от ПДК) и 1,09 мг/м³ (91 % от ПДК) соответственно. Возможной причиной отмеченных возрастаний содержания СО является усиление промышленной активности и ухудшение условий рассеивания загрязняющих веществ в атмосфере. На станции АВ-4 22 марта 2023 года была зафиксирована концентрация оксида углерода равная 4,83 мг/м³, что составляет 96 % от ПДК. Результаты рассмотрения структуры проводимых на Чаяндинском месторождении мероприятий указывают на то, что отмеченное повышение концентраций, вероятно, связано с проведением плановых работ на фонде скважин при проведении отжига скважинной продукции.

В 2023 году концентрации керосина в целом соответствовали установленным нормам. Максимальное значение было зафиксировано на станции АВ-1 – 1,09 мг/м³, что составляет 91 % от ПДК. На станции АВ-5 5 июня 2021 года было отмечено максимальное разовое значение близкое к ПДК – 1,14 мг/м³. На станции АВ-3 концентрации керосина в целом соответствовали установленным нормам. 6 июня 2021 года и в декабре 2023 г. здесь зафиксированы повышенные его содержания в воздухе – 0,9 мг/м³ (75 % от ПДК) и 0,95 мг/м³ соответственно (79 % от ПДК). Отмеченные всплески концентрации керосина в воздухе на Чаяндинском месторождении могут быть связаны с выбросами дизельных электростанций (ДЭС) и автомобильного транспорта в период их активной работы.

20 июня 2022 года на станции АВ-9 было зафиксировано значительное превышение ПДК метана – 122 мг/м³ (244 % ПДК), что вероятно связано с плановыми геологическими работами на фонде газодобывающих скважин. Установленный факт превышения ПДК обуславливает целесообразность установки датчиков утечки для предотвращения возможных утечек метана в будущем.

В таблице представлены сводные данные по всем контролируемым показателям, включая ПДК, максимальные и средние значения, а также случаи превышения этих показателей. Эти данные дают возможность произвести комплексную оценку состояния атмосферного воздуха на территории Чаяндинского НГКМ и выявить наиболее проблемные участки.

Таблица

Сводные данные по контролируемым показателям в атмосферном воздухе на Чаяндинском месторождении

Table

Summary data on controlled parameters in the atmospheric air at the Chayanda field

| Параметр | ПДК (мг/м ³) | Максимальное значение (мг/м ³) | | | Среднее значение (мг/м ³) | Кол-во превышений ПДК | Наличие превышения | |
|---------------|-----------------------------|--|-----------|-------------|---------------------------------------|-----------------------|--------------------|---------|
| | | значение | № станции | Дата отбора | | | | |
| Диоксид азота | NO ₂ | 0,4 | 0,115 | AB-8 | 11.10.2022 | <0,02 | 0 | Нет |
| Оксид азота | NO | 0,2 | 0,7 | AB-5 | 14.03.2022 | <0,03 | 2 | Разовое |
| Метан | CH ₄ | 50 | 122 | AB-9 | 20.06.2022 | <30 | 1 | Разовое |

| | | | | | | | | |
|--------------------|-----------------|-----------|-------------|------|------------|-------------|---|---------|
| Оксид углерода | CO | 5 | 4,83 | AB-4 | 22.03.2023 | <1,5 | 0 | Нет |
| Бенз(а)пирен | | 0,0000001 | <0,00000005 | | | <0,00000005 | 0 | Нет |
| Керосин | | 1,2 | 1,14 | AB-5 | 20.06.2023 | <0,6 | 0 | Нет |
| Диоксид серы | SO ₂ | 0,5 | 2,052 | AB-1 | 29.03.2021 | <0,025 | 1 | Разовое |
| Пыль | | 0,5 | 0,282 | AB-1 | 06.06.2021 | <0,26 | 0 | Нет |
| Взвешенные частицы | | 0,15 | 0,061 | AB-3 | 29.03.2021 | <0,03 | 0 | Нет |
| Углеводороды | C12-C19 | 1 | 0,055 | AB-2 | 31.03.2021 | <0,8 | 0 | Нет |

В целом, качество атмосферного воздуха на территории месторождения соответствует нормативным требованиям. Большинство контролируемых показателей не превышают установленных ПДК, а средние концентрации загрязняющих веществ остаются на низком уровне, что свидетельствует об эффективности действующих природоохранных мероприятий.

По некоторым видам загрязняющих веществ были зафиксированы разовые превышения установленных норм ПДК. Это может быть связано с периодом обустройства инфраструктуры месторождения и локальной деятельностью строительных организаций на его территории.

В июне 2022 года на станции AB-9 был зафиксирован высокий уровень метана, что вызывает серьезную обеспокоенность. Указанный факт требует повышенного внимания и контроля на этапах эксплуатации коммуникаций и объектов инфраструктуры.

Основные источники выбросов загрязняющих веществ можно классифицировать следующим образом: дизельные электростанции (их доля составляет 35 %); работы по вводу объектов инфраструктуры в эксплуатацию (30 %); автомобильный транспорт (25 %).

Анализ влияния климатических факторов на загрязнение воздуха показал, что в зимний период, при температурах ниже -30°C, концентрации оксида углерода и оксидов азота в среднем увеличиваются на 30 % по сравнению с летними показателями. Такое положение дел, вероятно, связано со слабым рассеиванием, которое обусловлено явлениями температурной инверсии, характерным для данного региона. В то же время, летом зафиксирован рост концентраций SO₂ и керосина, что обусловлено возрастанием промышленной активности на территории месторождений.

Таким образом, проведенный анализ изменений основных показателей качества атмосферного воздуха позволил получить общее представление о его состоянии и выявить проблемные зоны, требующие разработки и внедрения мер по снижению антропогенного воздействия.

Обсуждение

Полученные результаты указывают, что климатические условия значительно влияют на концентрации загрязняющих компонентов в атмосферном воздухе на Чаяндинском месторождении, что, вероятно, обусловлено изменениями характера протекания процессов рассеивания в атмосфере. Выявленные пространственные закономерности распределения загрязнений позволяют определить наиболее проблемные участки на исследуемой территории, которые требуют особого внимания природоохранных служб. При этом стоит отметить некоторые ограничения исследования, связанные с отсутствием данных о фоновых концентрациях и относительно коротким периодом наблюдений.

Практическая значимость работы заключается в том, что ее результаты могут быть использованы для улучшения системы экологического контроля на промышленных объектах. В частности, рекомендуется установить каталитические очистители на дизельных электростанциях, внедрить систему мониторинга утечек метана в режиме реального времени и оптимизировать

транспортные маршруты для снижения выбросов оксидов азота. Перспективным направлением для дальнейших исследований может стать изучение долгосрочного воздействия промышленных выбросов на арктические экосистемы.

По итогам рассмотрения, систематизации и анализа материалов исследования определены следующие меры, направленные на повышение экологической эффективности:

- на этапе проектирования и обустройства месторождения необходимо предусматривать установку систем каталитической очистки выхлопных газов ДЭС;
- необходимо осуществлять регулярный мониторинг газовых коммуникаций с целью своевременного выявления и предотвращения утечек;
- оптимизация расположения пунктов мониторинга с учетом выявленных сезонных изменений характера атмосферной циркуляции.

Заключение

Результаты проведенного анализа показали, что качество атмосферного воздуха на Чаяндинском НГКМ соответствует установленным нормам. Однако в период активного освоения и запуска месторождения в эксплуатацию были зафиксированы разовые превышения допустимых значений по ряду загрязняющих веществ, что требует дополнительных мер для снижения локальных превышений. С учетом разницы между средними и максимальными значениями показателей концентрации выбросов загрязняющих веществ, реализация предложенного авторами комплекса мер обладает перспективами к снижению уровня загрязнения на 30–40 % в течение двух-трех лет.

Литература

1. Ашихмина, Т.Я., Кантор, Г.Я., Васильева, А.Н. *Экологический мониторинг: учебно-методическое пособие*. Москва: Академический проект. 2020. 415. Доступно на: <https://profspo.ru/books/110087> (дата обращения: 12 февраля 2025).
2. Перепеличенко, В.Ф. Перспективы освоения уникального нефтегазоконденсатного месторождения Якутии. *Георесурсы, геонергетика, geopolитика*. 2012; 1(5): 67.
3. Крючков, В.Е. и Пензин, А.А. Перспективы увеличения разведанных запасов углеводородов Чаяндинского нефтегазоконденсатного месторождения. *Научно-технический сборник – Вестник газовой науки*. 2016; 1(25): 34–39.
4. Крючков, В.Е. и Медведев, А.Г. Литолого-фациальные и геодинамические условия формирования вендинских отложений Чаяндинского месторождения. *Научно-технический сборник – Вестник газовой науки*. 2012; 3(25): 202–207.
1. Давыдов, А.В., Погрецкий, А.В., Смирнов, О.А. и др. Чаяндинское месторождение – проект внедрения новых технологий в Восточной Сибири. *Вестник ПНИПУ. Геология. Нефтегазовое и горное дело*. 2017; 2:113–128.
2. Латышенко, К.П. *Экологический мониторинг: учебник и практикум для вузов*. 3-е изд., перераб. и доп. Москва: Юрайт. 2025. 450. Доступно на: <https://urait.ru/bcode/560602> (дата обращения: 11 февраля 2025).
3. Сурикова, Т.Б. *Экологический мониторинг: учебник*. 4-е изд., перераб. и доп. Старый Оскол: ТНТ. 2020. 344. Доступно на: <https://www.tnt-ebook.ru/library/book/211> (дата обращения: 17 февраля 2025).

References

1. Ashikhmin, T.Ya., Kantor, G.Ya., Vasilyeva, A.N., et al. *Environmental Monitoring: Educational and Methodological Guide*. 4th ed. Moscow: Academic Project; 2020. Available at: <https://profspo.ru/books/110087> (accessed: 12 February 2025) (in Russian).
1. Perepelichenko V.F. Prospects for the development of the unique oil and gas condensate field in Yakutia. *Georesources, Geoeconomics, Geopolitics*. 2012;1(5):67 (in Russian).
2. Kryuchkov V.E., Penzin A.A. Prospects for increasing the proved hydrocarbon reserves of the Chayanda oil and gas condensate field. *Scientific and Technical Collection – Gas Science News*. 2016;1(25):34–39 (in Russian).

3. Kryuchkov V.E., Medvedev A.G. Lithological-Facies and Geodynamic Conditions of Formation of the Vendian Deposits of the Chayandinsky Field. *Scientific and Technical Collection – Gas Science News*. 2012;3(25):202–207 (in Russian).
4. Davydov A.V., Pogretsky A.V., Smirnov O.A., et al. The Chayanda Field – a Project for Introducing New Technologies in Eastern Siberia. *Bulletin of PNRPU. Geology. Oil and Gas Industry and Mining*. 2017;(2):113–128 (in Russian).
5. Latyshenko K.P. *Environmental Monitoring: Textbook and Workshop for Universities*. 3rd ed., revised. and expanded. Moscow: Yurayt; 2025. Available at: <https://urait.ru/bcode/560602> (accessed: 11 February 2025) (in Russian).
6. Surikova T.B., 2020. *Environmental monitoring: a textbook*. 4th ed., revised and add. Stary Oskol: TNT. Available at: <https://www.tnt-ebook.ru/library/book/211> (accessed: 17 February 2025) (in Russian).

Об авторах

МАХОРИН Андрей Васильевич – нач. отдела охраны окружающей среды ООО «Газпром добыча Ноябрьск», SPIN-код: 2268-3824, AuthorID: 558385
e-mail: mahorin.av@noyabrsk-dobycha.gazprom.ru

АГАМЕДОВА Оксана Викторовна – зам. нач. отдела охраны окружающей среды ООО «Газпром добыча Ноябрьск»
e-mail: agamedova.ov@noyabrsk-dobycha.gazprom.ru

БУЛЬТИНОВ Максим Владимирович – гл. инженер Чаяндинского нефтегазопромыслового управления ООО «Газпром добыча Ноябрьск»
e-mail: bultinov.mv@noyabrsk-dobycha.gazprom.ru

ЦЫДЕНОВА Ольга Вячеславовна – зам. нач. отдела охраны окружающей среды Чаяндинского нефтегазопромыслового управления ООО «Газпром добыча Ноябрьск», SPIN-код: 3658-2126, AuthorID: 1322747
e-mail: tsidenva.ov@noyabrsk-dobycha.gazprom.ru

ЯДРИХИНСКИЙ Иван Васильевич – к.г.н., доц., СВФУ им. М.К. Аммосова, SPIN-код: 3493-9605, AuthorID: 747609
e-mail: yadroid@mail.ru

About the authors

Andrey V. MAKHORIN – Head of the Environmental Protection Department, Gazprom Dobycha Noyabrsk, LLC, Noyabrsk, Russian Federation, SPIN code: 2268-3824, AuthorID: 558385
e-mail: mahorin.av@noyabrsk-dobycha.gazprom.ru

Oksana V. AGAMEDOVA – Deputy Head of the Environmental Protection Department, Gazprom Dobycha Noyabrsk, LLC, Noyabrsk, Russian Federation
e-mail: agamedova.ov@noyabrsk-dobycha.gazprom.ru

Maxim V. BULTINOV – Chief Engineer, Chayanda Oil and Gas Field Management, Gazprom Dobycha Noyabrsk, LLC, Noyabrsk, Russian Federation
e-mail: bultinov.mv@noyabrsk-dobycha.gazprom.ru

Olga V. TSIDENOVA – Deputy Head of the Environmental Protection Department, Chayanda Oil and Gas Production Administration, Gazprom Dobycha Noyabrsk, LLC, Noyabrsk, Russian Federation, SPIN-код: 3658-2126, AuthorID: 1322747
e-mail: tsidenva.ov@noyabrsk-dobycha.gazprom.ru

Ivan V. YADRIKHINSKY – Cand. Sci. (Geography), Associate Professor, M. K. Ammosov North-Eastern Federal University, SPIN-код: 3493-9605, AuthorID: 747609
e-mail: yadroid@mail.ru

Вклад авторов

Все авторы внесли эквивалентный вклад в подготовку публикации

Authors' contribution

All authors made equivalent contributions to the publication.

Конфликт интересов

Авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов

Conflict of interests

The authors declare no relevant conflict of interests

Поступила в редакцию / Submitted 24.09.2025

Поступила после рецензирования / Revised 10.11.2025

Принята к публикации / Accepted 24.12.2025

ИСТОЧНИКИ ЗАГРЯЗНЕНИЯ ВОДЫ РТУТЬЮ В КРУПНЫХ УРБАНИЗИРОВАННЫХ ДЕЛЬТАХ АФРИКИ И АЗИИ

*A. V. Михайленко, Д. А. Рубан**

Южный федеральный университет,

г. Ростов-на-Дону, Россия

*ruban-d@mail.ru

Аннотация

Быстрый рост урбанизации в крупных речных дельтах усиливает антропогенное воздействие на водные объекты, имеющие огромное значение для устойчивости уникальных аквальных ландшафтов и снабжения населения питьевой водой. В частности, происходит загрязнение воды ртутью из различных источников. Последние должны быть установлены для лучшей координации природопользования. Цель настоящей работы – обобщение научной информации об источниках загрязнения воды ртутью в крупных урбанизированных дельтах Азии и Африки. Материал для исследования собран с помощью международной библиографической системы по стандартизованным поисковым запросам с последующей «ручной» фильтрацией и выделением требуемых данных. Аналитические процедуры предполагали не только систематизацию этих данных, но и оценку их четкости, а также типизацию источников загрязнения. Установлено, что информация о повышенных концентрациях ртути в воде имеется для шести крупных урбанизированных дельт, из которых наиболее загрязнены дельты Нила, Меконга и Нигера. Источники загрязнения разнообразны и связаны, в частности, с горно- и нефтедобывающей деятельностью, сельским хозяйством, поступлением сточных вод и отходов. Некоторые загрязнители не связаны с урбанизацией или располагаются на удалении от дельт. Выявлено, что информация об источниках загрязнения воды ртутью не всегда конкретна, во многих случаях их значимость не аргументируется, а лишь предполагается, исходя из общих представлений. Практическая значимость сделанных выводов определяется указаниями на возможные факторы нарушения устойчивости природопользования в урбанизированных дельтах. Перспективы последующих исследований связаны, прежде всего, с расширением географического фокуса и совершенствованием подходов к сбору и критической оценке научной информации о разных аспектах антропогенной нагрузки на уникальные природные ландшафты.

Ключевые слова: аквальные ландшафты, антропогенная нагрузка, библиографический анализ, геоэкологические проблемы, города, загрязнение окружающей среды, качество воды, речные дельты, сточные воды, тяжелые металлы, урбанизация

Для цитирования: Михайленко А.В., Рубан Д.А. Источники загрязнения воды ртутью в крупных урбанизированных дельтах Африки и Азии. *Вестник СВФУ*. 2025;(4): 86-98. DOI: 10.25587/2587-8751-2025-1-86-98

Original article

SOURCES OF WATER POLLUTION BY MERCURY IN LARGE URBANIZED DELTAS OF AFRICA AND ASIA

*Anna V. Mikhailenko, Dmitry A. Ruban**

Southern Federal University, Rostov-on-Don, Russia

*ruban-d@mail.ru

Abstract

Urbanization of large river deltas strengthens anthropogenic pressure on water objects, which are of utmost importance for sustainability of aquatic landscapes and freshwater provision. The aim of the present work was to synthesize the scientific information about sources of water pollution by mercury in large urbanized deltas of

Asia and Africa. The materials for this study were collected with an international bibliographical database via standardized search, with subsequent “manual” filtration and data extraction. The analytical procedures included the data systematization and evaluation of data certainty, as well as typization of the pollution sources. It was established that the evidence of elevated concentrations of mercury in water is available from six deltas, from which the most polluted are those of the Nile, the Mekong, and the Niger. The pollution sources are diverse and related, particularly, to mining and petroleum extraction, agriculture, and discharge of wastewater and solid waste. Some sources are not linked to urbanization or located far from deltas. The information about the pollution sources is often uncertain. The practical importance of the findings is determined by the indication of the possible factors of sustainability disturbance in urbanized deltas. Prospects for further research are associated, first of all, with expanding the geographical focus and improving approaches to collecting and critically evaluating scientific information on various aspects of anthropogenic pressure on unique natural landscapes.

Keywords: aquatic landscape, anthropogenic pressure, bibliographical survey, geoecological problems, cities, environmental pollution, water quality, river deltas, wastewater, heavy metals, urbanization

For citation: Mikhailenko A.V., Ruban D.A. Sources of water pollution by mercury in large urbanized deltas of Africa and Asia. *Vestnik of North-Eastern Federal University. Earth Sciences.* 2025;(4): 86-98. DOI: 10.25587/2587-8751-2025-1-86-98

Введение

Урбанизация оказывает существенное влияние на крупные речные дельты, которое усилилось в последние десятилетия [1, 2]. Соответствующие процессы имеют не только историко-культурные предпосылки, но и стимулируются богатством природных ресурсов дельт, их ключевым логистическим расположением. Урбанизация дельтовых пространств увеличивает спрос на воду со стороны растущего населения, а также поднимает вопрос об адекватной защите уникальных аквальных ландшафтов. При решении обеих задач, неразрывно связанных с устойчивым развитием крупных территорий, огромное значение имеет значительное антропогенное загрязнение воды из-за избыточного формирования отходов и стоков, а также промышленной и транспортной деятельности в пределах городов. Характерными примерами являются дельты рек Меконг [3] и Янцзы [4]. Стоит подчеркнуть, что такое загрязнение представляет собой комплексный феномен, в связи с чем видится необходимым рассмотрение его отдельных аспектов, таких как загрязнение воды ртутью.

Предметом настоящей работы выступает загрязнение ртутью речных дельт в условиях урбанизации. Ртуть является очень токсичным элементом, повышенные концентрации которого в воде представляют опасность для биоты и здоровья человека [5–7]. Ее поступление с городских территорий создает риски для аквальных ландшафтов [8]. Промышленная, транспортная и прочая деятельность, типичная для городов, способствует росту содержаний ртути в водных объектах дельт, и соответствующее загрязнение часто оказывается неизбежным. Объектом работы является литературная информация о факторах загрязнения воды ртутью в крупных дельтах. Предыдущие исследования показали, что возможные источники этого тяжелого металла, связанные с городскими территориями, разнообразны, и точно установить их удается не всегда [9–11]. Однако знания о них необходимы как для концептуальных разработок, так и для лучшего планирования природоохранной деятельности и сопутствующих экологических мероприятий. Следовательно, отдельные фрагменты этих знаний, рассеянные в международной научной литературе, нуждаются в обобщении, систематизации и критическом осмыслении.

Целью настоящей работы является синтез имеющейся научной информации об источниках загрязнения воды ртутью в крупных урбанизированных дельтах Азии и Африки. Актуальность цели определяется быстрой урбанизацией крупных дельт [1, 2] и потребностью в надежной информационной основе для корректного понимания механизмов загрязнение водной среды токсичным металлом. Для успешного научного решения соответствующих геоэкологических проблем необходимо обобщение опубликованных данных о факторах загрязнения, а также оценка

их качества, что также позволит наметить перспективы последующих исследовательских работ. Отмеченный географический фокус обусловлен, с одной стороны, интенсивным протеканием процессов урбанизации в дельтах именно азиатских и африканских рек, а, с другой, – наличием достаточного количества новых знаний именно об этих дельтах. Действительно, именно на отмеченных континентах в крупных дельтах концентрируется городское население, что делает их особо подверженными значительной антропогенной нагрузке. Совместное рассмотрение дельт Азии и Африки определяется сходными социально-экономическими условиями формирования отмеченной нагрузки, а также необходимостью обобщения как можно большего количества материала. На других континентах крупные дельты или не испытывают урбанизации, или для них отсутствует свежая информация о загрязнении воды ртутью. Работа сочетает элементы обзора с аналитическими процедурами, связанными с определением качества научной информации.

Материалы и методы исследования

Информация об источниках ртутного загрязнения воды в крупных речных дельтах может быть получена из научной литературы, наиболее значимая часть которой включает публикации в международных научных журналах. Поиск данных может быть осуществлен с помощью библиографической системы «Scopus», пригодность которой для решения подобного рода задач подтверждена ранее проведенными исследованиями [12–14]. Оптимальной организации поиска способствовали рекомендации, обозначенные в протоколе PRISMA [15].

Материал для настоящей работы был собран в три приема (рис. 1). Исходный поиск осуществлялся с помощью строгого и расширенного запросов в отмеченной выше библиографической системе. Такая двойственность объясняется обнаруженной неинформативностью одного лишь строгого запроса. Стандартизованные формулы запросов (рис. 1) позволяют избежать произвольности в выборе источников. Сформированные выборки литературных источников анализировались на предмет релевантности. Интерес представляли только те статьи, которые были опубликованы в течение последних десяти лет, посвящены крупным речным дельтам азиатских и африканских рек с высоким уровнем урбанизации, содержат информацию об источниках ртути конкретно в водной среде (чаще всего, речной воде). Под крупными дельтами понимаются те, что сформированы реками длиной не менее 1000 км и имеют площадь не менее 5–10 тыс. км². О высоком уровне урбанизации можно судить по наличию в дельте или, как минимум, одного крупного города или нескольких городов. Из общего количества собранной литературы только 12 источников были признаны релевантными (рис. 1), и такое количество вполне объяснимо небольшим числом исследований в силу не только их тематической специфики, но и методологической сложности (последняя ограничивает их широкое применение). Сравнительно узкий временной диапазон (10 лет) был выбран для обеспечения однородности информации. Это связано с изменением урбанизации в дельтах, трансформацией факторов загрязнения, совершенствованием методик изучения ртути в водной среде и соответствующего оборудования в течение даже сравнительно коротких промежутков времени.

Далее содержание релевантной литературы подвергалось тщательному изучению для выделения информации об источниках загрязнения и оценке ее общего характера и качества. Попутно фиксировались сведения о концентрациях металла в воде, однако настоящая работа не ставит целью критическое рассмотрение последних.

Собранный материал позволил реализовать три аналитические процедуры. Во-первых, разрозненные блоки информации сводились воедино для краткой характеристики источников загрязнения ртутью каждой из рассмотренных дельт. Во-вторых, критически рассматривалась аргументация каждого предлагаемого источника загрязнения. Это важно для понимания четкости соответствующей научной информации, что относится к ее качеству. В-третьих, для всех дельт проводилось разделение загрязнителей на удаленные (расположенные за пределами дельты) и локальные (расположенные непосредственно в пределах дельты). Также выделялись источники загрязнения, специфичные для дельт и специфичные для урбанизированных территорий.

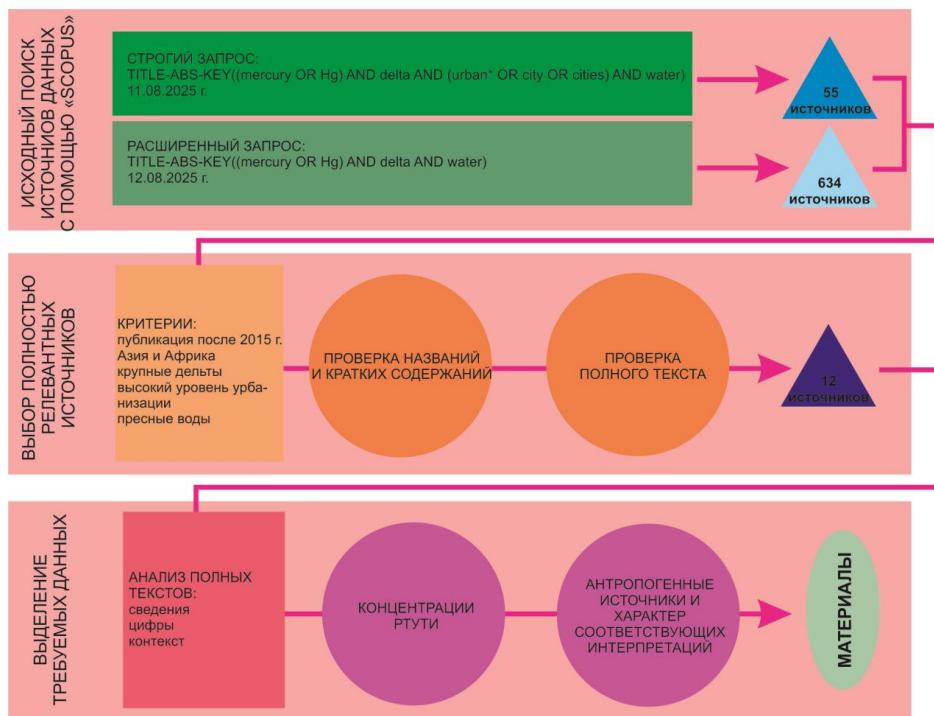


Рис. 1. Процедуры сбора материала для настоящей работы

Fig. 1. Procedures of the material collection for the present work

Результаты

Крупные урбанизированные дельты четырех азиатских и двух африканских рек характеризуются наличием сведений о загрязнении воды ртутью (рис. 2). При этом стоит отметить их подверженность значительному антропогенному воздействию в целом (табл. 1), и загрязнение воды ртутью выступает лишь одним из проявлений последнего. Если рассматривать все крупные урбанизированные дельты Азии и Африки, то многие из них охвачены данным анализом. Наиболее существенным исключением оказывается дельта реки Ганг, для которой не обнаружилось свежей информации.



Рис. 2. Расположение рассматриваемых дельт

Fig. 2. Location of the considered deltas

Таблица 1
Крупные урбанизированные дельты Азии и Африки, рассматриваемые в настоящей работе

Table 1
Large urbanized deltas of Asia and Africa considered in the present work

| Река | Длина реки, км | Площадь дельты, тыс. км ² | Сведения о значительном антропогенном воздействии | Анализируемые литературные источники о загрязнении воды ртутью |
|---------|----------------|--------------------------------------|---|--|
| Меконг | ~4500 | ~40 | [16, 17] | [30] |
| Нигер | ~4200 | ~70 | [18, 19] | [25, 31] |
| Нил | 6650 | ~25 | [20] | [26, 27, 32] |
| Хонгха | ~1150 | ~15 | [21] | [34, 35] |
| Хуанхэ | ~5500 | ~5,5 | [22, 23] | [35] |
| Чжуцзян | 2400 | ~55 | [24] | [36–38] |

Концентрации ртути в воде в рассматриваемых дельтах варьируют в широких пределах (как в пределах каждой дельты, так и между ними). Максимальные значения зафиксированы в дельтах Нила, Меконга и Нигера (табл. 2), где имеет место сильное загрязнение. Стоит отметить, что дельта реки Нигер рассматривается как своеобразная аномальная зона с очень высоким содержанием ртути в воде (*англ. mercury hotspot*), что свидетельствует об исключительной интенсивности антропогенного воздействия [25]. Однако степень загрязнения воды в дельте реки Нил оказывается еще большей [26, 27], и, следовательно, логично предположить наличие нескольких зон такого рода на рассматриваемых континентах. Подобные аномальные зоны ранее были установлены в других регионах мира (не для дельт) и имеют, напротив, природное происхождение [28, 29].

Таблица 2
Содержание ртути в воде крупных урбанизированных дельт Азии и Африки

Table 2
Mercury content in water of the large urbanized deltas of Asia and Africa

| Река | Концентрации ртути, нг/л | Пояснения | Источники информации |
|---------|--------------------------|--|----------------------|
| Меконг | 190000 | Валовое содержание, максимальное значение | [30] |
| Нигер | 85000 | | [25] |
| | 8000 | | [31] |
| | 398000 | | [26] |
| Нил | 153000 | | [27] |
| | 80 | | [32] |
| | 120 | Валовое содержание, максимальное значение, во время наводнений | [33] |
| Хонгха | 60 | | [34] |
| | 60 | Содержание в растворенной форме, максимальное значение | |
| Хуанхэ | <250 | Валовое содержание, среднее значение | [35] |
| Чжуцзян | 20 | Валовое содержание, среднее значение | [36] |

Специалистами выделялись разнообразные источники загрязнения воды ртутью. В дельте реки Меконг к ним относятся сельскохозяйственные стоки с обширных площадей возделывания риса [30]. Важность именно этого источника надежно аргументирована. Для дельты реки Нигер обращается внимание на вклад в загрязнение нефтедобычи и промышленной деятельности, а также сельского хозяйства, сбросов сточных вод и поступления ртути из атмосферы [25, 31]. Последний источник не является в полной мере антропогенным и связан с транспортировкой ртути воздушными массами на длительные расстояния. Отметим, что обозначенные для этой дельты источники загрязнения лишь предполагаются, обоснования в литературе не приведено.

Сравнительно больше работ посвящено дельте реки Нил. Ртутное загрязнение связывается с попаданием сточных вод (в том числе и промышленных) и мусора в водные объекты [26, 27, 32]. Лишь в одном случае соответствующие интерпретации обосновываются личными наблюдениями авторов. Однако последние фиксируют лишь потенциальные антропогенные угрозы и не устанавливают связи конкретно с ртутью. Большой частью выводы об источниках загрязнения делаются на основе предположений, ранее выдвигавшихся объяснений и касаются химического загрязнения в целом. Аналогичным образом указываются источники поступления ртути для дельты реки Хонгха, связываемые со сжиганием топлива, промышленной деятельностью и мусорными отходами [34, 35].

Несколько более определенными оказываются интерпретации, сделанные для дельты реки Хуанхэ. Здесь в качестве источников загрязнения рассматриваются объекты нефтяной и химической промышленности, сельскохозяйственная деятельность, различные стоки и отходы [35]. Но и в этом случае специалисты делают отсылку к собственным наблюдениям за антропогенным воздействием, частично опираясь на предположения, исходящие из общетеоретических знаний.

В дельте реки Чжуцзян загрязнение воды ртутью относительно невелико, однако его источники рассматривались в целом ряде работ с детальными интерпретациями. В одной из них аргументировано, что наиболее значимым из них является горнодобывающая деятельность далеко за пределами дельты, при этом меры по борьбе с загрязнением на территории последней вполне эффективны [36]. Интерпретации другой исследовательской группы в целом согласуются с таким объяснением [37]. Еще одна статья сфокусирована на поступлении ртути из атмосферы: тщательный анализ свидетельствует о предельно малом (около 1 %) вкладе этого источника, тогда как сточные воды и образовавшиеся при их очистке илы могут в большей степени способствовать загрязнению [38].

Обобщая вышесказанное, можно отметить разнообразие источников загрязнения воды ртутью в крупных урбанизированных дельтах. Далее имеет смысл подразделить загрязнители на группы в зависимости от их удаленности от дельты и специфики (табл. 3).

Анализ собранного материала показывает, что локальные источники загрязнения зафиксированы для всех рассмотренных дельт, тогда как удаленные – лишь для некоторых из них (табл. 3). К последним можно отнести атмосферный перенос и горнодобывающую деятельность.

Многие речные дельты известны своим значительным сельскохозяйственным потенциалом [39] и существенными запасами углеводородного сырья [40–42]. Следовательно, связанные с их эксплуатацией виды деятельности можно рассматривать в качестве специфичных для дельт источников загрязнения. Действительно, они установлены в более чем половине случаев (табл. 3). Важно, что вода почти всех дельт загрязняется за счет поступления ртути из источников, связанных с процессами урбанизации (табл. 3).

Таблица 3

Основные типы источников загрязнения воды ртутью в крупных урбанизированных дельтах Азии и Африки

Table 3

Principal types of sources of water pollution by mercury in the large urbanized deltas of Asia and Africa

| Река | Источники загрязнения | | | |
|---------|--------------------------|-----------|-----------------------|---|
| | По удаленности от дельты | | По специфике | |
| | Удаленные | Локальные | Специфичные для дельт | Специфичные для урбанизированных территорий |
| Меконг | | + | + | |
| Нигер | + | + | + | + |
| Нил | | + | + | + |
| Хонгха | | + | | + |
| Хуанхэ | | + | + | + |
| Чжуцзян | + | + | | + |

Обсуждение

Проанализированная литература в целом удовлетворительно характеризует особенности загрязнения воды ртутью в крупных урбанизированных дельтах Азии и Африки. Однако изучение аргументации, представленной авторами статей, делает эту характеристику менее четкой. Часто источники загрязнения только предполагаются. В ряде случаев не проведено четкого различия между наблюдаемой антропогенной деятельностью (потенциальная угроза) и повышенными концентрациями ртути (реализованная угроза). Это неоднозначный подход: например, исходя из общих знаний об атмосферном переносе ртути, можно предположить его значимость в конкретном случае, тогда как в действительности этот источник может играть совсем ограниченную роль [38]. Лишь для дельт рек Меконг и Чжуцзян можно обнаружить детальное прослеживание специалистами причинно-следственных связей (см. выше). Нередко анализ источников загрязнения носит не только пробабилистический, но и сугубо локальный характер. Специалисты пытаются обнаружить их на рассматриваемой территории, тогда как известна возможность их расположения на значительном удалении от дельт [36].

Отмеченные особенности выделения и отсутствия обоснования источников загрязнения воды ртутью в крупных урбанизированных дельтах азиатских и африканских дельт снижают качество соответствующей информации. Тем не менее она видится вполне достаточной для концептуализации рассматриваемой научной проблематики. Во-первых, подтверждается специфичность таких дельт, их самостоятельность как особых загрязняемых ртутью систем. Во-вторых, протекание процессов урбанизации вовсе не исключает (и, вероятно, не снижает) значимости несвязанных с ней источников загрязнения, как локальных, так и удаленных. В-третьих, достижение очень высоких концентраций ртути в водных объектах (табл. 2) вовсе необязательно связано с разнообразием источников загрязнения.

Заключение

Настоящая работа позволяет сделать три общих вывода. Во-первых, быстрая урбанизация крупных дельт в Азии и Африке сопровождается загрязнением воды ртутью, и в ряде случаев оно носит катастрофический характер. Во-вторых, источники загрязнения связаны со значительной антропогенной нагрузкой и специфичны для дельт и/или урбанизированных территорий. В-третьих, и количество, и качество информации о загрязнителях ограничены, а интерпретации причинно-следственных связей часто пробабилистичны. При этом последний вывод не снижает значимости двух предыдущих и не противоречит валидности выполненного исследо-

вания, т.к. последнее во многом и было направлено на определение качества ранее опубликованных сведений об источниках загрязнения воды ртутью в крупных дельтах Азии и Африки.

Методологическое значение настоящей работы двояко. Прежде всего, оно заключается в выявленной необходимости критического отношения к качеству информации о загрязнителях из международных публикаций при реализации новых исследовательских проектов. Кроме того, сделанные выводы позволяют указать на необходимость проведения специальных исследований, нацеленных именно на прослеживание причинно-следственных связей между антропогенной деятельностью, потенциально оказывающей влияние на речные дельты, и реально происходящим повышением концентраций конкретных тяжелых металлов.

Практическая значимость сделанных выводов определяется систематизацией информации о возможных источниках загрязнения воды ртутью в крупных урбанизированных дельтах, что важно для обеспечения их устойчивости и рационализации природопользования. Кроме того, представленная информация может способствовать лучшему пониманию важного аспекта геоэкологической проблематики в современном развитии ряда стран Азии и Африки, которые стоит учитывать при развитии сотрудничества с ними.

Перспективы последующих исследований связаны, с одной стороны, с расширением географии подобного рода исследований, а, с другой, – с сопоставлением международного и отечественного опыта для выработки лучших практик природопользования и минимизации негативного антропогенного воздействия при активном освоении дельтовых пространств. Кроме того, требуется совершенствование алгоритмов извлечения и критической оценки конкретной геоэкологической информации из научной литературы, что может стать предметом самостоятельных исследований.

Литература

1. Haq BU, Milliman JD Perilous Future for River Deltas. *GSA Today*. 2023;33:4-12.
2. McGranahan G, Balk D, Colenbrander S, Engin H, MacManus K Is rapid urbanization of low-elevation deltas undermining adaptation to climate change? A global review. *Environment and Urbanization*. 2023;35:527-559.
3. Hong TTK, Giao NT Analysis of Surface Water Quality in Upstream Province of Vietnamese Mekong Delta Using Multivariate Statistics. *Water*. 2022;14:1975.
4. Chen Y, Zhou K, Xu Y How environmental stress will be spatially reconfigured under artificial sources and scale mismatch? A case in Yangtze River Delta, China. *Humanities and Social Sciences Communications*. 2025;12:503.
5. Basu M Impact of Mercury and Its Toxicity on Health and Environment: A General Perspective. *Environmental Science and Engineering*. 2023;F1792:95-139.
6. Kayani KF, Mohammed SJ Mercury in aquatic environments: toxicity and advances in remediation using covalent organic frameworks. *Materials Advances*. 2025;6:3371-3385.
7. Kumar V, Umesh M, Shanmugam MK, Chakraborty P, Duhan L, Gummadi SN, Pasrija R, Jayaraj I, Dasarahally Huligowda LK A Retrospection on Mercury Contamination, Bioaccumulation, and Toxicity in Diverse Environments: Current Insights and Future Prospects. *Sustainability*. 2023;15:13292.
8. Cojoc L, de Castro-Català N, de Guzmán I, González J, Arroita M, Besolí-Mestres N, Cadena I, Freixa A, Gutiérrez O, Larrañaga A, Muñoz I, Elosegi A, Petrovic M, Sabater S Pollutants in urban runoff: Scientific evidence on toxicity and impacts on freshwater ecosystems. *Chemosphere*. 2024;369:143806.
9. Allen A, Dietrich M, McLeod CL, Gillis M, Gokey K, Mbindi MF, Krekeler MPS Investigating mercury in road sediment in Michigan City, Indiana: A new type of environmental pollution record. *Environmental Advances*. 2024;15:100483.
10. Lin H, Zhu X, Feng Q, Guo J, Sun X, Liang Y Pollution, sources, and bonding mechanism of mercury in street dust of a subtropical city, southern China. *Human and Ecological Risk Assessment*. 2019;25:393-409.
11. Wip D, Warneke T, Petersen AK, Notholt J, Temme C, Kock H, Cord P Urban mercury pollution in the City of Paramaribo, Suriname. *Air Quality, Atmosphere and Health*. 2013;6:205-213.

12. Javan K, Darestani M, Ibrar I, Pignatta G Interrelated issues within the Water-Energy-Food nexus with a focus on environmental pollution for sustainable development: A review. *Environmental Pollution*. 2025;368:125706.
13. Silva MC, do Nascimento Monte C, de Souza JR, Selfe ACC, Ishihara JH Mapping of metals contamination in coastal sediments around the world in the last decades: A bibliometric analysis and systematic review. *Marine Pollution Bulletin*. 2024;205:116572.
14. Yuniarti E, Exposto LASM, Dewata I, Nugraha FAD, Alfitri Health and Environmental Pollution: A Literature Review. *Kesmas Jurnal Kesehatan Masyarakat Nasional*. 2024;19:38-45.
15. Page MJ, McKenzie JE, Bossuyt PM, Boultron I, Hoffmann TC, Mulrow CD, Shamseer L, Tetzlaff JM, Akl EA, Brennan SE, Chou R, Glanville J, Grimshaw JM, Hrobjartsson A, Lalu MM, Li T, Loder EW, Mayo-Wilson E, McDonald S, McGuinness LA, Stewart LA, Thomas J, Tricco AC, Welch WA, Whiting P, Moher D The PRISMA 2020 statement: An updated guideline for reporting systematic reviews. *BMJ*. 2021;372:n71.
16. Seleznev DG, Dinh CN, Hai TB, Karpova EP, Chi DTK, Kosolapov DB, Kosolapova NG, Malin MI, Malina IP, Man LQ, Prokin AA, Prusova IY, Sharov AN, Statkevich SV, Tsvetkov AI, Udodenko YG, Zakonov VV, Zhdanova SM, Krylov AV, Tiunov AV Biodiversity of aquatic organisms in the Mekong Delta, Vietnam. *Biodiversity Data Journal*. 2023;11:e105314.
17. Smigaj M, Hackney CR, Diem PK, Tri VPD, Ngoc NT, Bui DD, Darby SE, Leyland J Monitoring riverine traffic from space: The untapped potential of remote sensing for measuring human footprint on inland waterways. *Science of the Total Environment*. 2023;860:160363.
18. Gbadamosi F, Aldstadt J The interplay of oil exploitation, environmental degradation and health in the Niger Delta: A scoping review. *Tropical Medicine and International Health*. 2025;30:351-367.
19. Zabbey N, Sam K, Onyebuchi AT Remediation of contaminated lands in the Niger Delta, Nigeria: Prospects and challenges. *Science of the Total Environment*. 2017;586:952-965.
20. Abdel-Raheem KHM, Khalil MM, Abdelhady AA, Tan L Anthropogenic-induced environmental and ecological changes in the Nile Delta over the past half-century. *Science of the Total Environment*. 2024;926:171941.
21. Dang TD, Tran TA Rural Industrialization and Environmental Governance Challenges in the Red River Delta, Vietnam. *Journal of Environment and Development*. 2020;29:420-448.
22. He D, Chu J, Yang H Environmental changes in Yellow River delta with terrace construction and agricultural cropping. *PeerJ*. 2021;9:e12469.
23. Huo Y, Yang M, Lei M, Wu P, Tian X, Yang T, Wang Z, Mao Y Advancements in water and ecological risk assessment in the Yellow River Delta, North China: Implications for legal frameworks in environmental protection and public health. *Water and Environment Journal*. 2024;38:162-168.
24. Wang F, Hao RJ Environmental Pollution in Pearl River Delta, China: Status and Potential Effects. *Journal of Environmental Informatics Letters*. 2020;3:110-123.
25. Anyanwu IN, Beggel S, Sikoki FD, Okuku EO, Unyimadu JP, Geist JP Pollution of the Niger Delta with total petroleum hydrocarbons, heavy metals and nutrients in relation to seasonal dynamics. *Scientific Reports*. 2023;13:14079.
26. Ramadan FS, Nour HE, Aita SK, Zahran HR Evaluation of heavy metals accumulation risks in water of the Qalubiya drain in East Delta, Egypt. *Arabian Journal of Geosciences*. 2021;14:1750.
27. Shaalan WA Hazardous effects of heavy metal pollution on Nile tilapia in the aquatic ecosystem of the Eastern Delta in Egypt. *BMC Veterinary Research*. 2024;20:585.
28. Graves SD, Kidd KA, Batchelar KL, Cowie AM, O'Driscoll NJ, Martyniuk CJ Response of Oxidative Stress Transcripts in the Brain of Wild Yellow Perch (*Perca flavescens*) Exposed to an Environmental Gradient of Methylmercury. *Comparative Biochemistry and Physiology Part C: Toxicology and Pharmacology*. 2017;192:50-58.
29. Soto Cárdenas CS, Fernandez Z, Arcagni M, Rizzo A, Diéguez MC Mercury Patterns in Lakes within a Natural Hotspot in the Southern Volcanic Zone of the Andes (Nahuel Huapi National Park, Patagonia, South America). *Environmental Chemistry*. 2025;22:EN24088.
30. Doan VT, Le CC, Le HVT, Trieu NA, Vo P, Tran D, Nguyen HV, Tabata T, Vu TTH Comprehensive Statistical Analysis for Characterizing Water Quality Assessment in the Mekong Delta: Trends, Variability, and Key Influencing Factors. *Sustainability*. 2025;17:5375.
31. Udiba UU, Odey MO, Ama J, Ayim EV, Akpan ER, Antai EE, Ebari SE, Ogbin IM Partition Coefficients and Metals Quality Index of Calabar and Great Kwa Rivers, Niger Delta, Nigeria. *Egyptian Journal of Aquatic Biology and Fisheries*. 2025;29:511-530.

32. Shetaia SA, Abu Khatita AM, Abdelhafez NA, Shaker IMA, El-Kafrawy SB Evaluation of potential health risk, heavy metal pollution indices and water quality of Edku lagoon – Egypt. *Egyptian Journal of Aquatic Biology and Fisheries*. 2020;24:265-290.
33. Nguyen NTT, Volkova IV Assessment of heavy metal pollution in water and sediments in the Red River delta (Vietnam). *IOP Conference Series: Materials Science and Engineering*. 2018;451:012203.
34. Nguyen NTT, Volkova IV, Egorova VI Distribution of Mercury in Water and Bottom Sediments of the Estuary Area of the Red River (Vietnam). *IOP Conference Series: Earth and Environmental Science*. 2019;224:012047.
35. Wang K, Liu N, Xia J, Chu X, Xu X, Zhang T, Hu G, Liu Y, Zhang H, Xu Y Características hidroquímicas y ambiente acuático de las aguas superficiales y subterráneas poco profundas en el norte del delta del río Amarillo, China. *Tecnología y Ciencias del Agua*. 2023;14:89-133.
36. Zhen G, Li Y, Tong Y, Yang L, Zhu Y, Zhang W Temporal variation and regional transfer of heavy metals in the Pearl (Zhujiang) River, China. *Environmental Science and Pollution Research*. 2016;23:8410-8420.
37. Liu J, Li X, Chang X, Fu Q, Tu X, Zhu Y, Wang E, Bai Y Distributional Characteristics and Probabilistic Health Risk Assessment of Heavy Metal Pollution in Centralized Surface Drinking Water Sources in Guangdong Province, China. *Research of Environmental Sciences*. 2025;38:282-293.
38. Huang M, Deng S, Dong H, Dai W, Pang J, Wang X Impacts of Atmospheric Mercury Deposition on Human Multimedia Exposure: Projection from Observations in the Pearl River Delta Region, South China. *Environmental Science and Technology*. 2016;50:10625-10634.
39. Lan NTP, Van Kien N Back to Nature-Based Agriculture: Green Livelihoods Are Taking Root in the Mekong River Delta. *Journal of People Plants and Environment*. 2021;24:551-561.
40. Day JW, Clark HC, Chang C, Hunter R, Norman CR Life cycle of oil and gas fields in the mississippi river delta: A review. *Water*. 2020;12:1492.
41. Deng Y, Yang Y, Yang T Three systems of the oil and gas formation in the world. *Petroleum Research*. 2025;10:1-27.
42. Thomas D Niger delta oil production, reserves, field sizes assessed. *Oil Gas Journal*. 1995;393:101-104.

References

1. Haq B.U., Milliman J.D. Perilous Future for River Deltas. *GSA Today*. 2023;33:4-12.
2. McGranahan G., Balk D., Colenbrander S., et al. Is rapid urbanization of low-elevation deltas undermining adaptation to climate change? A global review. *Environment and Urbanization*. 2023;35:527-559.
3. Hong T.T.K., Giao N.T. Analysis of surface water quality in upstream province of Vietnamese Mekong Delta using multivariate statistics. *Water*. 2022;14:1975.
4. Chen Y., Zhou K., Xu Y. How environmental stress will be spatially reconfigured under artificial sources and scale mismatch? A case in Yangtze River Delta, China. *Humanities and Social Sciences Communications*. 2025;12:503.
5. Basu M. Impact of Mercury and Its Toxicity on Health and Environment: A General Perspective. *Environmental Science and Engineering*. 2023;F1792:95-139.
6. Kayani K.F., Mohammed S.J. Mercury in aquatic environments: toxicity and advances in remediation using covalent organic frameworks. *Materials Advances*. 2025;6:3371-3385.
7. Kumar V., Umesh M., Shanmugam M.K., et al. A retrospection on mercury contamination, bioaccumulation, and toxicity in diverse environments: Current insights and future prospects. *Sustainability*. 2023;15:13292.
8. Cojoc L., de Castro-Català N., de Guzmán I., et al. Pollutants in urban runoff: Scientific evidence on toxicity and impacts on freshwater ecosystems. *Chemosphere*. 2024;369:143806.
9. Allen A., Dietrich M., McLeod C.L., et al. Investigating mercury in road sediment in Michigan City, Indiana: A new type of environmental pollution record. *Environmental Advances*. 2024;15:100483.
10. Lin H., Zhu X., Feng Q., et al. Pollution, sources, and bonding mechanism of mercury in street dust of a subtropical city, southern China. *Human and Ecological Risk Assessment*. 2019;25:393-409.
11. Wip D., Warneke T., Petersen A.K., et al. Urban mercury pollution in the City of Paramaribo, Suriname. *Air Quality, Atmosphere and Health*. 2013;6:205-213.
12. Javan K., Darestani M., Ibrar I., Pignatta G. Interrelated issues within the Water-Energy-Food nexus with a focus on environmental pollution for sustainable development: A review. *Environmental Pollution*. 2025;368:125706.

13. Silva M.C., do Nascimento Monte C., de Souza J.R., et al. Mapping of metals contamination in coastal sediments around the world in the last decades: A bibliometric analysis and systematic review. *Marine Pollution Bulletin*. 2024;205:116572.
14. Yunarti E., Exposto L.A.S.M., Dewata I., et al. Health and Environmental Pollution: A Literature Review. *Kesmas Jurnal Kesehatan Masyarakat Nasional*. 2024;19:38–45.
15. Page M.J., McKenzie J.E., Bossuyt P.M., et al. The PRISMA 2020 statement: An updated guideline for reporting systematic reviews. *BMJ*. 2021;372:n71.
16. Seleznev D.G., Dinh C.N., Hai T.B., et al. Biodiversity of aquatic organisms in the Mekong Delta, Vietnam. *Biodiversity Data Journal*. 2023;11:e105314.
17. Smigaj M., Hackney C.R., Diem P.K., et al. Monitoring riverine traffic from space: The untapped potential of remote sensing for measuring human footprint on inland waterways. *Science of the Total Environment*. 2023;860:160363.
18. Gbadamosi F., Aldstadt J. The interplay of oil exploitation, environmental degradation and health in the Niger Delta: A scoping review. *Tropical Medicine and International Health*. 2025;30:351–367.
19. Zabbey N., Sam K., Onyebuchi A.T. Remediation of contaminated lands in the Niger Delta, Nigeria: Prospects and challenges. *Science of the Total Environment*. 2017;586:952–965.
20. Abdel-Raheem K.H.M., Khalil M.M., Abdelhady A.A., Tan L. Anthropogenic-induced environmental and ecological changes in the Nile Delta over the past half-century. *Science of the Total Environment*. 2024;926:171941.
21. Dang T.D., Tran T.A. Rural Industrialization and Environmental Governance Challenges in the Red River Delta, Vietnam. *Journal of Environment and Development*. 2020;29:420–448.
22. He D., Chu J., Yang H. Environmental changes in Yellow River delta with terrace construction and agricultural cropping. *PeerJ*. 2021;9:e12469.
23. Huo Y., Yang M., Lei M., et al. Advancements in water and ecological risk assessment in the Yellow River Delta, North China: Implications for legal frameworks in environmental protection and public health. *Water and Environment Journal*. 2024;38:162–168.
24. Wang F., Hao R.J. Environmental Pollution in Pearl River Delta, China: Status and Potential Effects. *Journal of Environmental Informatics Letters*. 2020;3:110–123.
25. Anyanwu I.N., Beggel S., Sikoki F.D., et al. Pollution of the Niger Delta with total petroleum hydrocarbons, heavy metals and nutrients in relation to seasonal dynamics. *Scientific Reports*. 2023;13:14079.
26. Ramadan F.S., Nour H.E., Aita S.K., Zahran H.R. Evaluation of heavy metals accumulation risks in water of the Qalubiya drain in East Delta, Egypt. *Arabian Journal of Geosciences*. 2021;14:1750.
27. Shaalan W.A. Hazardous effects of heavy metal pollution on Nile tilapia in the aquatic ecosystem of the Eastern Delta in Egypt. *BMC Veterinary Research*. 2024;20:585.
28. Graves S.D., Kidd K.A., Batchelar K.L., et al. Response of oxidative stress transcripts in the brain of wild yellow perch (*Perca flavescens*) exposed to an environmental gradient of methylmercury. *Comparative Biochemistry and Physiology Part C: Toxicology and Pharmacology*. 2017;192:50–58.
29. Soto Cárdenas C.S., Fernandez Z., Arcagni M., et al. Mercury patterns in lakes within a natural hotspot in the southern volcanic zone of the Andes (Nahuel Huapi National Park, Patagonia, South America). *Environmental Chemistry*. 2025;22:EN24088.
30. Doan V.T., Le C.C., Le H.V.T., et al. Comprehensive statistical analysis for characterizing water quality assessment in the Mekong Delta: Trends, variability, and key influencing factors. *Sustainability*. 2025;17:5375.
31. Udiba U.U., Odey M.O., Ama J., et al. Partition coefficients and metals quality index of Calabar and Great Kwa Rivers, Niger Delta, Nigeria. *Egyptian Journal of Aquatic Biology and Fisheries*. 2025;29:511–530.
32. Shetaia S.A., Abu Khatita A.M., Abdelhafez N.A., et al. Evaluation of potential health risk, heavy metal pollution indices and water quality of Edku lagoon – Egypt. *Egyptian Journal of Aquatic Biology and Fisheries*. 2020;24:265–290.
33. Nguyen N.T.T., Volkova I.V. Assessment of heavy metal pollution in water and sediments in the Red River delta (Vietnam). *IOP Conference Series: Materials Science and Engineering*. 2018;451:012203.
34. Nguyen N.T.T., Volkova I.V., Egorova V.I. Distribution of mercury in water and bottom sediments of the estuary area of the Red River (Vietnam). *IOP Conference Series: Earth and Environmental Science*. 2019;224:012047.
35. Wang K., Liu N., Xia J., et al. Características hidroquímicas y ambiente acuático de las aguas superficiales y subterráneas poco profundas en el norte del delta del río Amarillo, China. *Tecnología y Ciencias del Agua*. 2023;14:89–133.

36. Zhen G., Li Y., Tong Y., et al. Temporal variation and regional transfer of heavy metals in the Pearl (Zhujiang) River, China. *Environmental Science and Pollution Research*. 2016;23:8410–8420.
37. Liu J., Li X., Chang X., et al. Distributional characteristics and probabilistic health risk assessment of heavy metal pollution in centralized surface drinking water sources in Guangdong Province, China. *Research of Environmental Sciences*. 2025;38:282–293.
38. Huang M., Deng S., Dong H., et al. Impacts of atmospheric mercury deposition on human multimedia exposure: Projection from observations in the Pearl River Delta region, South China. *Environmental Science and Technology*. 2016;50:10625–10634.
39. Lan N.T.P., Van Kien N. Back to nature-based agriculture: Green livelihoods are taking root in the Mekong River Delta. *Journal of People Plants and Environment*. 2021;24:551–561.
40. Day J.W., Clark H.C., Chang C., et al. Life cycle of oil and gas fields in the Mississippi River Delta: A review. *Water*. 2020;12:1492.
41. Deng Y., Yang Y., Yang T. Three systems of the oil and gas formation in the world. *Petroleum Research*. 2025;10:1–27.
42. Thomas D. Niger delta oil production, reserves, field sizes assessed. *Oil Gas Journal*. 1995;393:101–104.

Об авторах

МИХАЙЛЕНКО Анна Владимировна – к.г.н., доцент Института наук о Земле ФГАОУ ВО «Южный федеральный университет», г. Ростов-на-Дону, Российская Федерация, ORCID: 0000-0003-1156-770X, Researcher ID: A-8847-2017, Scopus Author ID: 55971159100, SPIN: 2036-3311

E-mail: avmihaylenko@sfedu.ru

РУБАН Дмитрий Александрович – Ph.D., к.г.-м.н., доцент, доцент Института туризма, сервиса и креативных индустрий Южного федерального университета, г. Ростов-на-Дону, Российская Федерация, ORCID: 0000-0003-2847-645X, Researcher ID: W-7434-2019, Scopus Author ID: 8520926600, SPIN: 5671-0800

E-mail: ruban-d@mail.ru

About the authors

Anna V. MIKHAILENKO – Cand. Sci. (Geography), Associate Professor, Institute of Earth Sciences, Southern Federal University, Rostov-on-Don, Russian Federation, ORCID: 0000-0003-1156-770X, Researcher ID: A-8847-2017, Scopus Author ID: 55971159100, SPIN: 2036-3311

E-mail: avmihaylenko@sfedu.ru

Dmitry A. RUBAN – Ph.D. (Geology), Cand. Sci. (Geology-Mineralogy), Docent, Associate Professor, Institute of Tourism, Service and Creative Industries, Southern Federal University, Rostov-on-Don, Russian Federation, ORCID: 0000-0003-2847-645X, Researcher ID: W-7434-2019, Scopus Author ID: 8520926600, SPIN: 5671-0800

E-mail: ruban-d@mail.ru

Вклад авторов

Михайленко А. В. – проведение исследования, создание черновика рукописи, редактирование рукописи, руководство исследованием

Рубан Д. А. – разработка концепции, верификация данных, проведение исследования, создание черновика рукописи

Authors' contribution

Anna V. Mikhailenko – investigation, writing – original draft, writing – review & editing, supervision

Dmitry A. Ruban – conceptualization, validation, investigation, writing – original draft

Конфликт интересов

Авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов

Conflict of interests

The authors declare no relevant conflict of interests

Поступила в редакцию / Submitted 05.10.2025

Поступила после рецензирования / Revised 25.11.2025

Принята к публикации / Accepted 24.12.2025

**Вестник Северо-Восточного федерального университета
им. М.К. Аммосова.**

**Vestnik of North – Eastern Federal University.
Серия "Науки о Земле. Earth Sciences"**

Сетевое научное периодическое издание

№ 4(40) 2025

Технический редактор *А.Н. Егорова*
Компьютерная верстка *Л.М. Винокурова*
Оформление обложки *П.И. Антипин*

Подписано в печать 26.12.2025. Формат 70x108/16.
Дата выхода в свет 30.12.25.