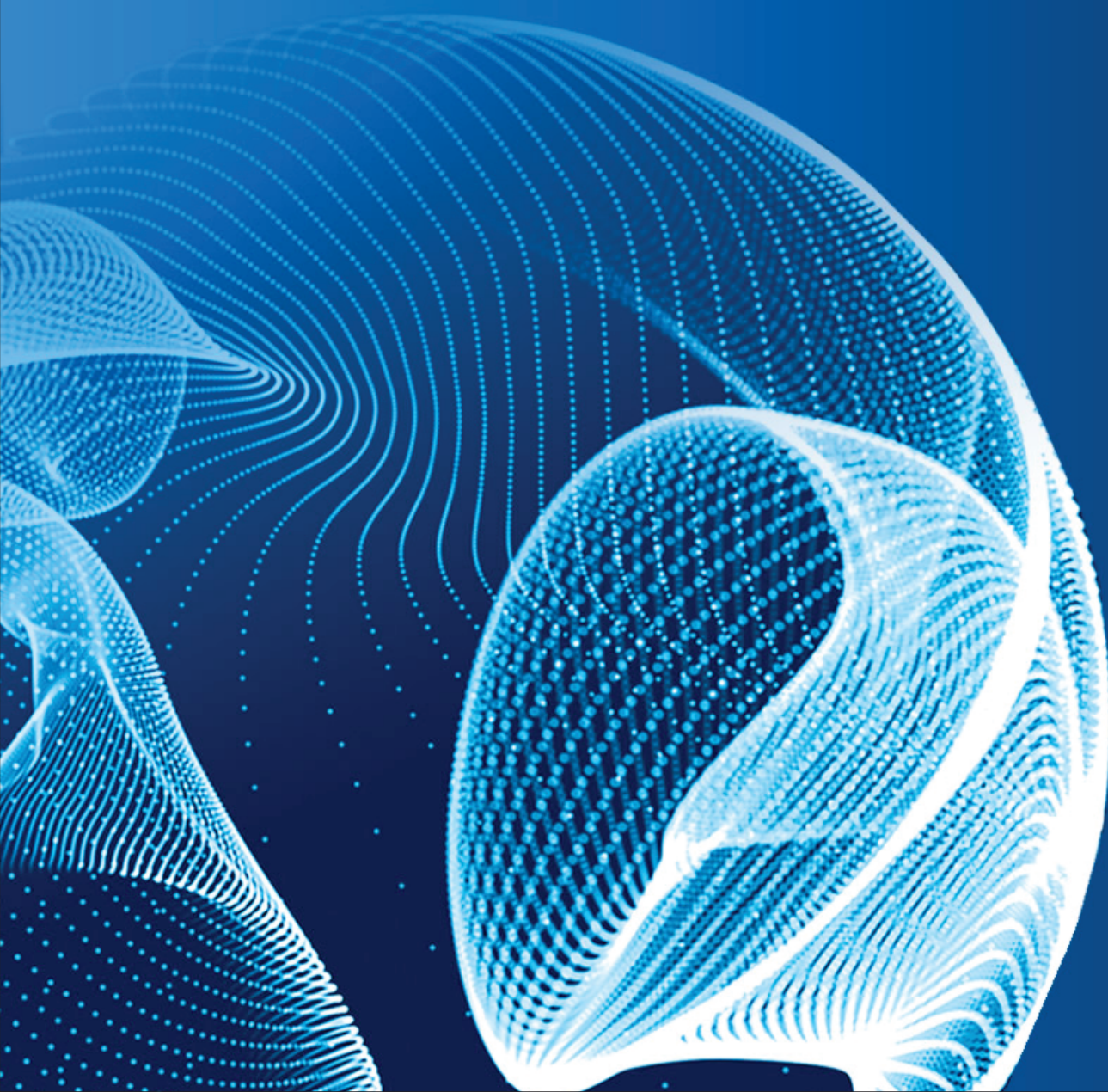


ENGINEERING JOURNAL of Satbayev University

Volume 146 (Issue 5)
October 2024



EDITOR-IN-CHIEF

Alma Bekbotayeva, PhD, associate professor, Geology and Petroleum Engineering Institute of Satbayev University, Kazakhstan

DEPUTY EDITOR-IN-CHIEF

Kanai Rysbekov, candidate of technical sciences, associate professor, Mining and Metallurgical Institute of Satbayev University, Kazakhstan

Vasyl Lozinskyi, PhD, associate professor, National TU Dnipro Polytechnic, Ukraine

MANAGING EDITOR

Gulziya Burshukova, PhD, associate professor, Satbayev University, Kazakhstan

MEMBERS OF THE EDITORIAL BOARD

Ata Utku Akçil, PhD, professor, Suleyman Demirel University, Turkey

Adilkhan Baibatsha, doctor of geological and mineralogical sciences, professor, Geology and Petroleum Engineering Institute of Satbayev University, Kazakhstan

Atac Bascetin, PhD, professor, Istanbul Technical University, Turkey

Madina Barmenshinova, candidate of technical sciences, associate professor, Mining and Metallurgical Institute of Satbayev University, Kazakhstan

Omirsirik Baigenzhanov, PhD, associate professor, Mining and Metallurgical Institute of Satbayev University, Kazakhstan

Tatiana Chepushtanova, PhD, associate professor, Mining and Metallurgical Institute of Satbayev University, Kazakhstan

Agata Duczmal-Czernikiewicz, PhD, habilit.doctor, professor, Adam Mickiewicz University, Poland

Serik Moldabaev, doctor of technical sciences, professor, Mining and Metallurgical Institute of Satbayev University, Kazakhstan

Brajendra Mishra, PhD, professor, Worcester Polytechnic Institute, USA

Suping Peng, professor, academician, Chinese Mining University, China

Reimar Seltsmann, PhD, professor, The Earth Sciences Department, Center for Russian and Central Asian Mineral Research (CERCAMS), Great Britain

Atsushi Shibayama, PhD, professor, Akita University, Japan

Olena Sdvizhkova, doctor of technical sciences, professor, National TU Dnipro Polytechnic, Ukraine

Khalidilla Yusupov, doctor of technical sciences, professor, Mining and Metallurgical Institute of Satbayev University, Kazakhstan

БАС ҒЫЛЫМИ РЕДАКТОР

Алма Бекботаева, PhD, қауымдастырылған профессор, Satbayev University Геология және мұнай-газ ісі институты, Қазақстан

БАС ҒЫЛЫМИ РЕДАКТОРДЫҢ ОРЫНБАСАРЛАРЫ

Қанай Рысбеков, т.ғ.к., қауымдастырылған профессор, Satbayev University Тай-кен-металлургия институты, Қазақстан

Василий Лозинский, PhD, қауымдастырылған профессор, «Днепр политехникасы» Ұлттық техникалық университеті, Украина

ЖАУАПТЫ ХАТШЫ

Гулзия Буршукова, PhD, қауымдастырылған профессор, Satbayev University, Қазақстан

РЕДАКЦИЯЛЫҚ АЛҚА МҮШЕЛЕРІ

Ata Utku Akçil, PhD, профессор, Сүлейман Демирел Университеті, Түркия

Әділхан Байбатша, г-м.ғ.д., профессор, Satbayev University Геология және мұнай-газ ісі институты, Қазақстан

Atac Bascetin, PhD, профессор, Ыстамбұл техникалық университеті, Түркия

Мадина Барменшинова, т.ғ.к., қауымдастырылған профессор, Satbayev University Тай-кен-металлургия институты, Қазақстан

Өмірсерік Байгенженов, PhD, қауымдастырылған профессор, Satbayev University Тай-кен-металлургия институты, Қазақстан

Татьяна Чепуштанова, PhD, қауымдастырылған профессор, Satbayev University Тай-кен-металлургия институты, Қазақстан

Agata Duczmal-Czernikiewicz, PhD, хабилит.доктор, профессор, Адам Мицкевич Университеті, Польша

Серік Молдабаев, т.ғ.д., профессор, Satbayev University Тай-кен-металлургия институты, Қазақстан

Brajendra Mishra, PhD, профессор, Вустер политехникалық институты, АҚШ

Suping Peng, профессор, академик, Қытай тау-кен университеті, ҚХР

Reimar Selmann, PhD, профессор, Жер туралы ғылымдар бөлімі, Ресей және Орта Азия минералды зерттеулер орталығы (CERCAMS), Ұлыбритания

Atsushi Shibayama, PhD, профессор, Akita University, Жапония

Олена Сдвижкова, т.ғ.д., профессор, «Днепр политехникасы» Ұлттық техникалық университеті, Украина

Халидилла Юсупов, т.ғ.д., профессор, Satbayev University Тай-кен-металлургия институты, Қазақстан

ГЛАВНЫЙ НАУЧНЫЙ РЕДАКТОР

Алма Бекботаева, PhD, ассоц.профессор, Институт геологии и нефтегазового дела Satbayev University, Казахстан

ЗАМЕСТИТЕЛИ ГЛАВНОГО НАУЧНОГО РЕДАКТОРА

Канай Рысбеков, к.т.н., ассоц.профессор, Горно-металлургический институт Satbayev University, Казахстан

Василий Лозинский, PhD, ассоц.профессор, Национальный технический университет «Днепропетровская политехника», Украина

ОТВЕТСТВЕННЫЙ СЕКРЕТАРЬ

Гулзия Буршукова, PhD, ассоц.профессор, Satbayev University, Казахстан

ЧЛЕНЫ РЕДАКЦИОННОЙ КОЛЛЕГИИ

Ata Utku Akçil, PhD, профессор, Университет Сулеймана Демиреля, Турция

Адилхан Байбатша, д.г-м.н., профессор, Институт геологии и нефтегазового дела Satbayev University, Казахстан

Atac Bascetin, PhD, профессор, Стамбульский технический университет, Турция

Мадина Барменшинова, к.т.н., Горно-металлургический институт Satbayev University, Казахстан

Омирсерик Байгенженов, PhD, ассоц.профессор, Горно-металлургический институт Satbayev University, Казахстан

Татьяна Чепуштанова, PhD, ассоц.профессор, Горно-металлургический институт Satbayev University, Казахстан

Agata Duczmal-Czernikiewicz, PhD, хабилит.доктор, профессор, Университет Адама Мицкевича, Польша

Серик Молдабаев, д.т.н., профессор, Горно-металлургический институт Satbayev University, Казахстан

Brajendra Mishra, PhD, профессор, Вустерский политехнический институт, США

Suping Peng, профессор, академик, Китайский горнопромышленный университет, КНР

Reimar Selmann, PhD, профессор, Отдел Наук о Земле, Центр Российских и Среднеазиатских Минеральных Исследований (CERCAMS), Великобритания

Atsushi Shibayama, PhD, профессор, Akita University, Япония

Олена Сдвижкова, д.т.н., профессор, Национальный технический университет «Днепропетровская политехника», Украина

Халидилла Юсупов, д.т.н., профессор, Горно-металлургический институт Satbayev University, Казахстан

Studies of the extraction of nickel and cobalt from magnetic enrichment tailings

K.K. Mamyrbayeva¹, A.N. Kuandykova¹, T.A. Chepushtanova¹, Y.S. Merkibayev^{1*}, M. Brajendra²

¹Satbayev University, Almaty, Kazakhstan

²Worcester Polytechnic Institute, Worcester, USA

*Corresponding author: y.merkibayev@satbayev.university

Abstract. The problem of processing stale tailings is a global one, and the main task is the extraction of economically valuable metals. In Kazakhstan, the market for the extraction of nickel and cobalt from stale tailings is practically undeveloped. In addition, the need for nickel and cobalt increases annually due to the high demand for nickel-cobalt batteries for the manufacture of electric vehicles, special alloys and others. Pyrite concentrate containing nickel-cobalt from Sokolovsko-Sarbaisky mining and processing plant is a valuable source of extraction of a number of valuable non-ferrous metals such as iron, nickel, cobalt, etc. The purpose of the study is to study the optimal conditions for the extraction of nickel and cobalt from thermally decomposed pyrite concentrate of the Sokolovsko-Sarbaisky mining and processing plant using sulfuric acid solutions. Thermodynamic analysis of oxidation reactions of the main components of pyrite concentrate showed that thermal decomposition of higher sulfides of iron, nickel and cobalt produced a series of non-stoichiometric lower sulfides $\text{Fe}_{0.877}\text{S}$, FeS , Fe_2S_3 , Fe_7S_8 ; Ni_3S_2 , Ni_3S_4 and $\text{CoS}_{0.89}$, CoS , respectively. The Pourbaix diagrams of Ni-S- H_2O , Co-S- H_2O and Fe-S- H_2O systems show that sulfuric acid leaching of cobalt and nickel from thermally decomposed pyrite concentrate is possible at pH 0 - 1.5 and $E > -0.5$ V. Leaching of non-stoichiometric $\text{FeS-Fe}_7\text{S}_8$ low iron sulfides is possible at pH 0 - 4.0 and $E > 0$ V. Studies to determine the optimum conditions of leaching of thermally treated pyrite concentrates found that for the extraction of nickel and cobalt effective concentration of sulfuric acid is 100 g/dm^3 , the leaching time is 120 minutes and temperature of 100°C and the maximum recovery of metals is 86.71% and 93.01%, respectively. Increasing the acid concentration, duration and temperature leads to complete dissolution of iron. A combined method for processing stale pyrite tailings can be used to process similar raw materials.

Keywords: leaching, nickel, cobalt, degree of extraction, sulfuric acid, acidity of the medium.

1. Введение

Никель и кобальт обладают уникальными свойствами и за последние 5 лет наблюдается рост спроса на кобальт на 70% и на никель на 40%.

Высокий спрос на никель и кобальт связаны прежде всего с требованиями и нуждами развития экологически чистых технологий и решений, и как следствие с быстрым развитием отрасли по производству электропроводников, специальных сплавов, электромобилей и сетевых технологий [1-2].

Сырьевыми источниками никеля и кобальта являются сульфидные и латеритные руды, однако последние из-за сложности их переработки до сих пор не вовлечены в производство в Казахстане.

Дополнительным источником этих металлов являются хвосты действующих предприятий. Рынок извлечения кобальта и никеля в республике также из лежалых хвостов практически не развит.

На сегодняшний день хвосты магнитной сепарации, содержащие целый ряд ценных компонентов (кобальт, никель, медь, благородные металлы и др.) не перерабатываются, а складываются в хвостохранилищах, занимающих большие площади сельскохозяйственных угодий.

Кроме этого, в хвостах и техногенном сырье, производимых действующими металлургическими предприятиями страны теряются значительное их количество, например, только в Соколовско-Сарбайском ГОК (далее - ССГПО) теряется более 7 тысяч тонн никеля и 14 тысяч тонн кобальта в год. Как было отмечено исследователями Финляндии, Австралии [3, 4] содержание никеля в хвостах ниже, чем в добываемых в настоящее время сульфидных рудах, оно аналогично содержаниям латеритных руд. Поэтому такое сырье можно рассматривать как низкосортный мультиминеральный ресурс будущего, а не как отход и экологический ущерб от переработки никеля, более того при разработке эффективной технологии переработки из них можно получить значительную выгоду.

Прямая переработка никелькобальтсодержащих руд, промпродуктов, отходов предприятий пирометаллургическими процессами эффективна только при содержании в них более 1% никеля и кобальта. Железосодержащие силикатные руды с низким содержанием целевых металлов в основном перерабатываются гидрометаллургическими технологиями. Однако, широкому применению гидрометаллургических технологий препятствуют большие инвестиции в инфраструктуру рудного месторождения, высокая стоимость реагентов и невысокое извлечение ценных

металлов из руд. Возможность переработки сложных низкосортных никелевых латеритных руд и материалов с помощью кучного выщелачивания очень ограничена из-за трудности растворения окисленных никелевых минералов, так как они представляют собой оксиды и сульфиды сложного минералогического состава и содержат низкие содержания никеля и кобальта, а также трудноразрешимых геотехнических и гидрологических проблем, таких как плохая пористость, проницаемость кучей и структурная стабильность.

Для переработки никелькобальтсодержащих упорных руд, промпродуктов, отходов применяются различные методы переработки, а именно атмосферное кислотное выщелачивание [5-10], кислотное выщелачивание под давлением кислорода [11, 12], щелочное выщелачивание [13, 14], выщелачивание с добавкой различных окислителей и добавок [15, 16].

Латеритные минералы более высокого качества перерабатываются промышленным путем с помощью пирро- и гидрометаллургических методов, выбор зависит от химического и минералогического состава материалов. Пирометаллургические методы переработки используются для руд с содержанием никеля выше 1.5 (мас.%). Руды подвергаются обработке с помощью определенных энергоемких процессов, таких как сушка, прокаливание, обжиг, высокотемпературное восстановление и плавка, а в случае гидрометаллургических методов для обработки руд с целью выщелачивания металлов используются минеральные кислоты, неорганические и органические растворители или их сочетания.

Для переработки никелькобальтсодержащих промпродуктов и сульфидных отходов производств эффективно проводить комбинированные технологии, которые включают стадии предварительного обжига, выщелачивания и селективного извлечения с дальнейшим рафинированием металлов или их соединений [17, 18]. Наряду с этими проведены многочисленные исследования по переработке пиритных и пирротиновых концентратов в Австралии, Финляндии, Канаде. Например, на горнодобывающем предприятии в Садбери, Онтарио, Канада для переработки пиритных хвостов с содержанием никеля и кобальта использованы процессы магнитной сепарации и биовыщелачивание с различными культурами бактерий. В результате магнитного обогащения повышено содержание никеля в сырье; содержание никеля в магнитной фракции (значительно обогащенной пирротинном) было примерно на 50% выше, чем в немагнитной фракции. При биологическом выщелачивании соответственно при температуре $\geq 40^\circ\text{C}$ с продолжительностью 10 дней при pH - 1-3 степень выщелачивания никеля и кобальта повысилась от 80 до 90% и от 70 до 80%. Скорость растворения никеля значительно увеличивалось при наличии смешанной культуры железо- и сероокисляющих бактерий [19].

Абсолютное большинство процессов выщелачивания сульфидных материалов основано на окислении иона серы или до элементного состояния, или до сульфат-иона. В некоторых случаях возможно образование сульфат-иона, полиитионата и других соединений. Образование сероводорода возможно лишь при применении концентрированных кислот.

Наилучшие результаты при переработке пиритсодержащих материалов достигаются комбинированными технологиями, в начале которых используется активи-

рующая обработка, методы которой классифицируются следующим образом: механическая обработка: тонкое измельчение, диспергирование, активационное измельчение; гидрометаллургическая обработка: частичное восстановление, обработка крепкими кислотами, частичное окисление ионами меди или железа; электрохимическая обработка: частичное анодное окисление; термическая обработка: плавка, обжиг в вакууме, в атмосфере инертных и неокисляющих газов, обжиг в восстановительной атмосфере, восстановление спеканием с медью или железом, сульфидирование элементной серой, частичный окислительный обжиг, сульфатизирующий обжиг, обжиг-спекание-плавка с содой и поташом.

Однако во многих случаях простой обжиг руд не дает ожидаемых результатов. Исследованиями показано, что высокотемпературная сульфатизация окисленных руд при расходе серной кислоты 0.7 г на 1 г руды при температуре сульфатизации 420°C привело к увеличению извлечения никеля и составило 80-82%. В переработке никелевых руд [20] предлагается совершенно новый подход для переработки: после пирролиза при 600°C (продуктами которого являются оксиды с образованием шпинельных фаз NiAl_2O_4 и MgAl_2O_4) проводится азотно-кислотное выщелачивание под давлением (HPAL) с получением остатка, содержащий, % 15.8 Ni, 1.9 Co и 0.19 Sc. [21]. Недостатками являются высокий расход серной кислоты, применение агрессивных реагентов и дорогостоящих оборудований.

Как показал обзор исследований, в настоящее время отсутствуют данные по переработке аналогичных никелькобальтсодержащих материалов как отходы ССГПО и на сегодняшний день не существует оптимальной методики переработки.

Вместе с этим полученные при ССГПО пиритно-кобальтовые концентраты из-за сложности состав не позволяют применять стандартные технологии для их комплексной переработки. Такая проблема обуславливает необходимость проведения исследований и разработки эффективной комбинированной технологии извлечения железа, никеля и кобальта из хвостов, содержащий ценные металлы как никель и кобальт.

Основной целью данной исследовательской работы является изучение оптимальных условий выщелачивания продуктов обжига никелькобальтсодержащих пиритных хвостов ССГПО.

2. Материалы и методы

2.1 Исходные материалы и реагенты

В качестве исходного материала использовались хвосты магнитной сепарации ССГПО, полученные при переработке сульфидно-магнетитовых руд и содержащие в своем составе сульфиды железа, никеля, кобальта и другие примеси (далее – пиритный концентрат).

Для выщелачивания – термически обработанный пиритный концентрат, серная кислота концентраций 25-175 г/дм³.

2.1.2 Методы анализа

Для качественно-количественного анализа исходных твердых проб и растворов использовали химический, рентгенофазовый и атомно-абсорбционный методы анализа.

Рентгенофазовый анализ проводили на дифрактометре D8 Advance (BRUKER) по методу порошка с использованием отфильтрованного медного или кобальтового излучения при напряжении 40 кВ и силе тока – 30 мА.

Расчет термодинамических показателей процесса обжига и анализ систем «Ni-S-H₂O», «Co-S-H₂O» и «Fe-S-H₂O» выполнены с помощью программы Outotec HSC Chemistry. Величину pH водных растворов измеряли с помощью pH-метра марки pH-150МП со стандартными электродами.

2.2 Методика обжига и выщелачивания

Для повышения показателя процесса выщелачивания проводились процессы по обжигу исходных проб хвостов ССПГО. Обжиг пиритного концентрата проводился в печи кипящего слоя с кислородным дутьем с содержанием 15% кислорода, при температуре 650-700°C в течение 1 часа.

Процесс выщелачивания проводился в стеклянном реакторе помещенным в термостат. Скорость вращения мешалки при выщелачивании поддерживалась постоянно и был равен 500 об/мин. Навеска пиритной огарки массой 40 граммов загружалась в колбу и заливалась раствором серной кислоты заданной концентрации. Для выщелачивания использовались растворы серной кислоты концентраций от 25 до 175 г/дм³. Температура выщелачивания варьировалась от 20 до 120°C, продолжительность от 15 до 240 минут, соотношение твердой и жидкой фаз был равен минимальным и составил 1:2. Температура поддерживалась автоматически. Продолжительность опытов отсчитывалась с момента достижения заданной температуры. По окончании эксперимента по выщелачиванию твердая фаза отделялась от жидкой фазы фильтрованием. Содержание железа, никеля и кобальта в растворе определялись титриметрическим и спектрометрическим методом анализа.

3. Результаты и обсуждение

3.1 Термодинамический анализ процесса обжига

При выполнении термодинамического анализа возможных реакций диссоциирующего обжига материалов при температурах 273 К и 950 К, было установлено, что при обжиге FeS₂ в присутствии ограниченного количества кислорода возможно протекание реакции (1-2) с образованием сульфидов железа различного состава: Fe_{0,877}S, FeS, Fe₂S₃, Fe₇S₈. Структурно нестехиометрические пирротины представляют собой троилит с недостатком железа в его кристаллической решетке и описываются общей формулой Fe_{1-x}S. В зависимости от соотношения Fe:S свойства нестехиометрических пирротинных изменяются.

Сульфиды никеля и кобальта по реакциям 4 и 5 могут перейти в CoS_{0,89} и CoS, по реакциям 6-7 – дисульфид никеля переходит в Ni₃S₂ и Ni₃S₄, по реакциям 8-10 происходит трансформация сульфидов кобальта и никеля внутри области гомогенности. Рассчитанные значения энергии Гиббса подтверждают о возможности протекания данных реакций (таблица 1). Сульфиды кобальта по реакциям 4 и 5 могут перейти в CoS_{0,89} и CoS, по реакциям 6-7 – дисульфид никеля переходит в Ni₃S₂ и Ni₃S₄, по реакциям 8-9 происходит трансформация сульфидов никеля внутри области гомогенности.

Таблица 1. Термодинамический анализ реакций обжига отходов

№	Химическая реакция	ΔG ⁰ , кДж/моль		
		600°C	650°C	700°C
1.	FeS ₂ +1/2O ₂ =1/2Fe ₂ S ₃ +1/2SO ₂	-143.165	-143.189	-143.091
2.	FeS ₂ +6/7O ₂ =1/7Fe ₇ S ₈ +6/7SO ₂	-235.778	-238.369	-240.948
3.	Fe ₇ S ₈ +O ₂ =7FeS+SO ₂	-302.494	-307.656	-312.899
4.	CoS ₂ +O ₂ =CoS+SO ₂	-267.651	-268.978	-270.291
5.	CoS ₂ +1.11O ₂ =CoS _{0,89} +1.11SO ₂	-294.809	-295.919	-297.010
6.	NiS ₂ +2/3O ₂ =1/3Ni ₃ S ₄ +2/3SO ₂	-182.808	-183.844	-184.921
7.	NiS ₂ +4/3O ₂ =1/3Ni ₃ S ₂ +4/3SO ₂	-359.682	-361.853	-364.041
8.	Ni ₃ S ₄ +O ₂ =3NiS+SO ₂	-272.456	-273.333	-274.070
9.	NiS+1/3O ₂ =1/3Ni ₃ S ₂ +1/3SO ₂	-86.055	-86.897	-87.763

Рассчитанные значения энергии Гиббса в интервале температуры 600-700°C подтверждают о возможности протекания данных реакций самопроизвольно.

Таким образом, на основе термодинамического анализа можно заключить, что при термическом разложении высших сульфидов железа, никеля и кобальта образуется ряд нестехиометрических низших сульфидов.

3.2 Термодинамический анализ процесса выщелачивания

Для прогнозирования поведения металлов при серно-кислотном выщелачивании построены диаграммы Пурбэ систем Ni-S-H₂O, Co-S-H₂O и Fe-S-H₂O.

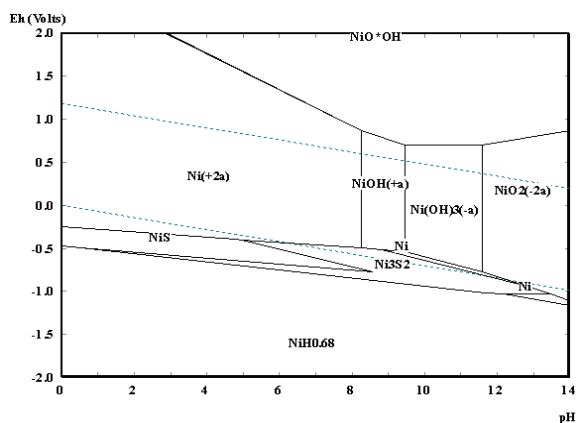
Анализ системы Ni-S-H₂O (рисунок 1, а) показывает, что в системе присутствуют конденсированные фазы NiH_{0,68}, Ni₃S₂, NiS, Ni, NiO·ОН. В интервале -0.51 В < Eh < -0.2 В никель находится в чистом виде и в виде сульфидов NiS, Ni₃S₂. Ниже Eh < -0.51 В - область устойчивости NiH_{0,68}.

С увеличением потенциала в системе Eh > -0.24 В сульфиды никеля растворяются с образованием ионов никеля (+2) в интервале pH от 0 до 8.2. С увеличением pH в системе от 8.2 и более в системе образуются ионы гидроксидов никеля такие, как NiOH⁺, Ni(OH)₃⁻. В сильнощелочной среде pH > 8.3 образуется анион (NiO₂)²⁻.

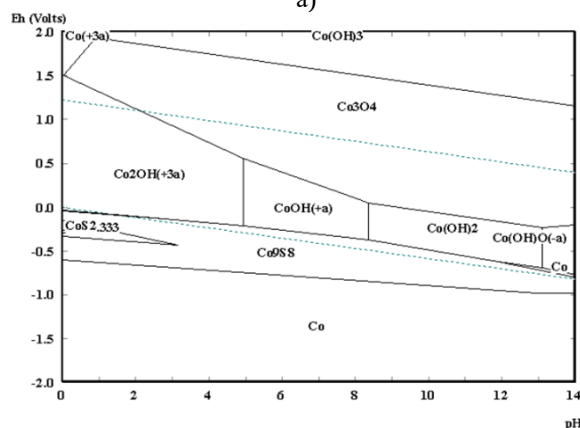
В системе Co-S-H₂O (рисунок 1, б) конденсированными фазами являются Co, CoS_{2,33}, Co₉S₈, Co(OH)₂, Co₃O₄ и Co(OH)₃. Сульфиды кобальта устойчивы в интервале -1.00 В > Eh > -0.00 В при всех значениях pH. Повышение потенциала от 0 до 1.5 приводит к растворению сульфидов и образованию гидрокомплексных соединений кобальта типа (Co₂OH)³⁺, (CoOH)⁺, Co(OH)₂. Переход кобальта в раствор в виде простого катиона Co²⁺ возможно только в сильнокислотной области и высоких значениях потенциала: в области Eh > 1.5 и в интервале pH 0-1.

Совместное рассмотрение диаграммы Co-S-H₂O, Ni-S-H₂O позволяет сделать вывод, что возможными условиями селективного перевода металлов из MeS в виде Ni²⁺ и Co²⁺ в раствор являются: pH 0-1.5 и окислительный потенциал E = -0.5 В и выше.

Термодинамический анализ диаграмм Пурбэ системы Fe-S-H₂O при температурах 25 и 100°C показывают, что системе могут быть следующие конденсированные фазы: FeO·ОН (рисунок 2 а) и Fe₂O₃ (рисунок 2 б).



a)



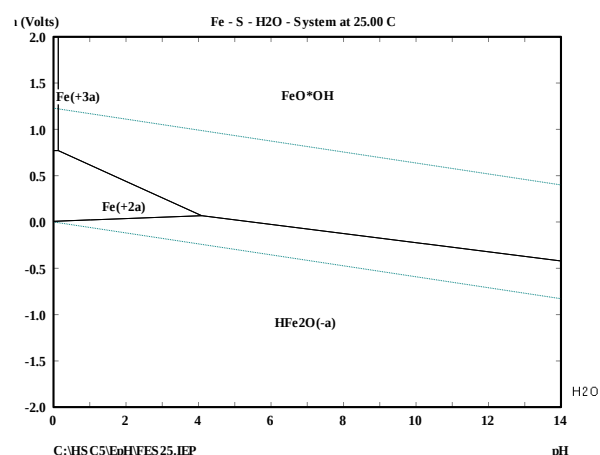
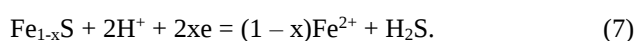
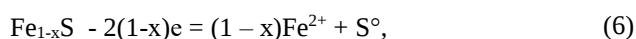
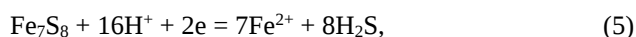
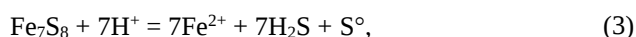
б)

Рисунок 1. Диаграммы Пурбэ систем а) Ni-S-H₂O; б) Co-S-H₂O

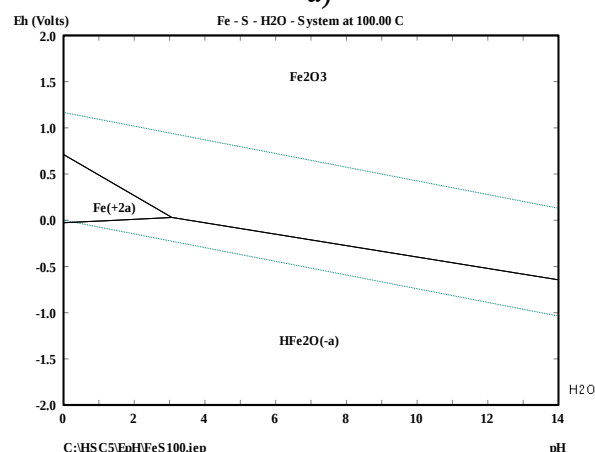
Выщелачивание высокосернистых пирротитов возможно при повышенном значении кислотности и окислительном потенциале в системе, так как сульфиды железа с увеличением содержания в них серы увеличивают свою химическую устойчивость.

Как видно из данных, приведённых на рисунке 2, кислотное безокислительное растворение троилита возможно при pH равном 4, а выщелачивание с окислением серы возможно при окислительно-восстановительном потенциале системы равном ± 0.0 В. В то же время, кислотное растворение пирротина (Fe_7S_8) возможно лишь при pH равном 0-2.0, окислительный потенциал более -0.4 В, а для окисления серы пирротина требуется создать окислительный потенциал в системе более 0.1 В.

Выщелачивание сульфидов железа от FeS до Fe_7S_8 может протекать как в безокислительных, так и в окислительных условиях (рисунок 2) по реакциям (1-7):



a)



б)

Рисунок 2. Диаграмма «потенциал – pH» системы Fe-S-H₂O а) при 25°C; б) при 100°C

Таким образом, термодинамический анализ диаграмм Пурбэ системы Fe-S-H₂O, влияния кислотности и окислительного потенциала системы позволяют сделать вывод о возможности селективного растворения сульфидов железа из смеси сульфидов никеля, кобальта и железа, и возможности селективного осаждения сульфидов никеля и кобальта из железистых растворов.

3.3 Влияние различных параметров на растворение металлов термически разложенного пиритного концентрата

В качестве исходных материалов использовался термически разложенный пиритный концентрат, полученный из хвостов ММС АО «ССГПО». Химический анализ пиритных огарков (таблице 2) показал, что основным компонентом огарка является железо, содержание никеля и кобальта низкие и составляют 0.1% и 0.21% соответственно.

Таблица 2. Химический состав огарка, полученный при термической обработке пиритных концентратов при 650°C

Продукт	Содержание, масс. %						
	Fe	Co	Ni	Cu	SiO ₂	Al ₂ O ₃	пр.
Термически разложенный пиритный концентрат	58.4	0.21	0.10	0.15	4.06	0.78	35.9

Как показывают результаты химического анализа содержание железа высокое и составляет 58.4%, а содержание никеля и кобальта – 0.10 и 0.21% соответственно. Проба после истирания подвергалась сернокислотному выщелачиванию.

3.4 Результаты выщелачивания

В качестве выщелачивающих реагентов никелькобальтсодержащих материалов можно применить серную, соляную, азотную и другие кислоты. Однако, среди всех сернокислотное выщелачивание является одним из наиболее распространенных методов выщелачивания, которое отличается высокой эффективностью, которое обеспечивает высокую скорость и полноту извлечения металлов. На результаты выщелачивания влияют многие факторы как концентрация раствора, продолжительность выщелачивания, температура, крупность твердой фазы, соотношение Т и Ж и многие другие факторы.

Выщелачивание обожженного концентрата проводилось в атмосферных условиях с изучением влияния концентрации серной кислоты, температуры и продолжительности.

3.4.1 Влияние концентрации H_2SO_4

Концентрация серной кислоты, идущей на растворение, была принята в интервале 25-125 г/дм³ исходя из условий работы в замкнутом цикле с возможностью регенерации растворителя, а также получения наименьших объемов растворов. Выщелачивание целевых металлов проводилось по описанной выше методике.

Результаты выщелачивания термически разложенного пиритного концентрата растворами кислот с концентрацией 25-175 г/дм³ представлены в рисунке 3.

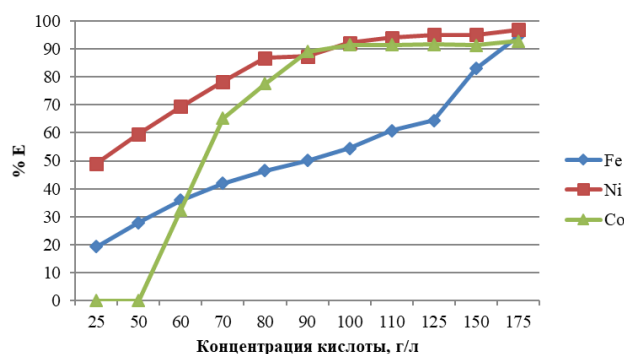


Рисунок 3. Зависимость извлечения металлов из огарка от концентрации серной кислоты

Как показывают результаты выщелачивания с повышением концентрации кислоты степень извлечения целевых металлов повышается. Извлечение Fe по сравнению с Ni и Co невысокое, при повышении концентрации кислоты от 25 до 175 г/дм³ степень извлечения повышается с 39.13 до 64.4%; при дальнейшем повышении концентрации кислоты степень извлечения железа не увеличивается только на 2%.

При повышении концентрации кислоты от 25 до 175 г/дм³ степень извлечения Ni изменяется от 59.56 до 86.71%, при повышении концентрации H_2SO_4 степень извлечения не меняется.

При концентрации кислоты 25 г/дм³ не происходит растворение Co. С повышением концентрации от 50 до 150 г/дм³ степень извлечения Co повышается от 32.48 до

93.01%, дальнейшее повышение концентрации кислоты не привело к увеличению степени извлечения.

Таким образом, на основе экспериментальных данных можно сделать вывод, что повышение концентрации кислоты приводит к интенсивному растворению Fe, который в дальнейшем будет негативно влиять на селективное разделение кобальта и никеля. Поэтому оптимальной концентрацией серной кислоты была выбрана концентрация 100 г/дм³.

3.4.2 Влияние продолжительности

Влияние продолжительности выщелачивания на растворимость показано на рисунке 4. Как показывают результаты проведенных исследований повышение продолжительности выщелачивания от 5 до 240 минут благотворно влияет на выщелачивание железа, никеля и кобальта.

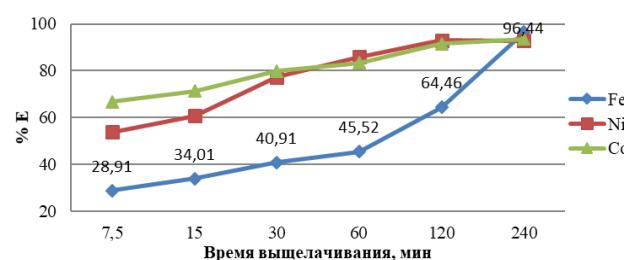


Рисунок 4. Зависимость извлечения металлов из пиритного огарка от продолжительности выщелачивания

При изучении влияния продолжительности наблюдается некоторое опережение растворения никеля и кобальта. Наиболее полное растворение целевых металлов концентрата наблюдается при продолжительности выщелачивания 2 часа и более. В начальном периоде, при повышении продолжительности выщелачивания от 7.5 до 60 минут растворение железа идет медленно и его степень извлечения находится в пределах 28.91-45.52%, при продолжительности процесса более 60 минут наблюдается резкий рост скорости растворения железа.

На основе полученных данных выявлено, что оптимальной продолжительностью выщелачивания продуктов обжига является 120 минут.

3.4.3 Влияние температуры

Изучалось влияние температуры на процесс выщелачивания. Количество растворителя было взято 100 г/дм³, продолжительность выщелачивания была принята равной 2 часам. Результаты исследований представлены на рисунке 5. Из полученных результатов следует отметить, что термически разложенный пиритный концентрат разлагается сравнительно легко.

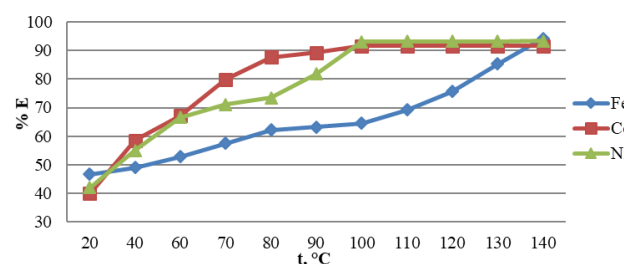


Рисунок 5. Зависимость растворения металлов из пиритного огарка от температуры

Наиболее полное растворение никеля и кобальта из огарка пиритного концентрата достигается при температуре 100°C. Наблюдается некоторая разница в скоростях выщелачивания никеля, кобальта и железа. При повышении температуры от 20 до 100°C степень растворения всех металлов повышается. Наиболее полное растворение никеля и кобальта протекает при 100°C, степень извлечения металлов составляет: 91.49% Co и 93.01% Ni. Дальнейшее повышение температуры приводит к резкому увеличению степени извлечения железа от 64.46 до 94.23%, тогда как степень извлечения никеля и кобальта повышаются только на 0.2-0.6%. На основе полученных данных оптимальной температурой выщелачивания можно считать температуру 100-110°C.

В результате сернокислотного выщелачивания исследуемого огарка в оптимальных условиях: концентрация кислоты – 100 г/л, продолжительности 120 минут, температуре – 100°C был получен продуктивный раствор с большим содержанием железа, состав которого приведен в таблице 3.

Таблица 3. Химический состав продуктивного раствора

Наименование продукта	Содержание, г/л			Извлечение, %		
	Co	Ni	Fe	Co	Ni	Fe
Концентрат	0.48	0.45	187.81	91.49	93.01	64.4

При избытке растворителя свыше 5% от теоретически необходимого количества и при продолжительности 240 минут происходит практически полное разложение термически разложенного пиритного концентрата, причем, увеличение количества растворителя влияет на извлечение никеля. Выщелачивание термически разложенного концентрата не требует больших избытков растворителя, тем более, если производить не периодическое одностадийное, а противоточное непрерывное выщелачивание.

Таким образом, на основании проведенных исследований определены условия процесса одностадийного выщелачивания термически разложенного пиритного концентрата – температура 100-110°C; продолжительности 2 часа, избыток растворителя 4-5%. Растворы после выщелачивания содержат около 187 г/дм³ железа, 0.5 г/дм³ никеля и 0.47 г/дм³ кобальта. При данных условиях извлечение в раствор составляет, %: никеля – 93.01, кобальта – 91.49, железа – 64.4.

3.5. Укрупненные исследования

На основе полученных результатов исследований предлагается следующая технологическая схема переработки пиритных никелькобальтсодержащих пиритных хвостов ССГПО (рисунок 6) с использованием процессов обжига и гидрометаллургической переработки огарка с использованием процессов, как выщелачивание, химическое осаждение и жидкостная экстракция.

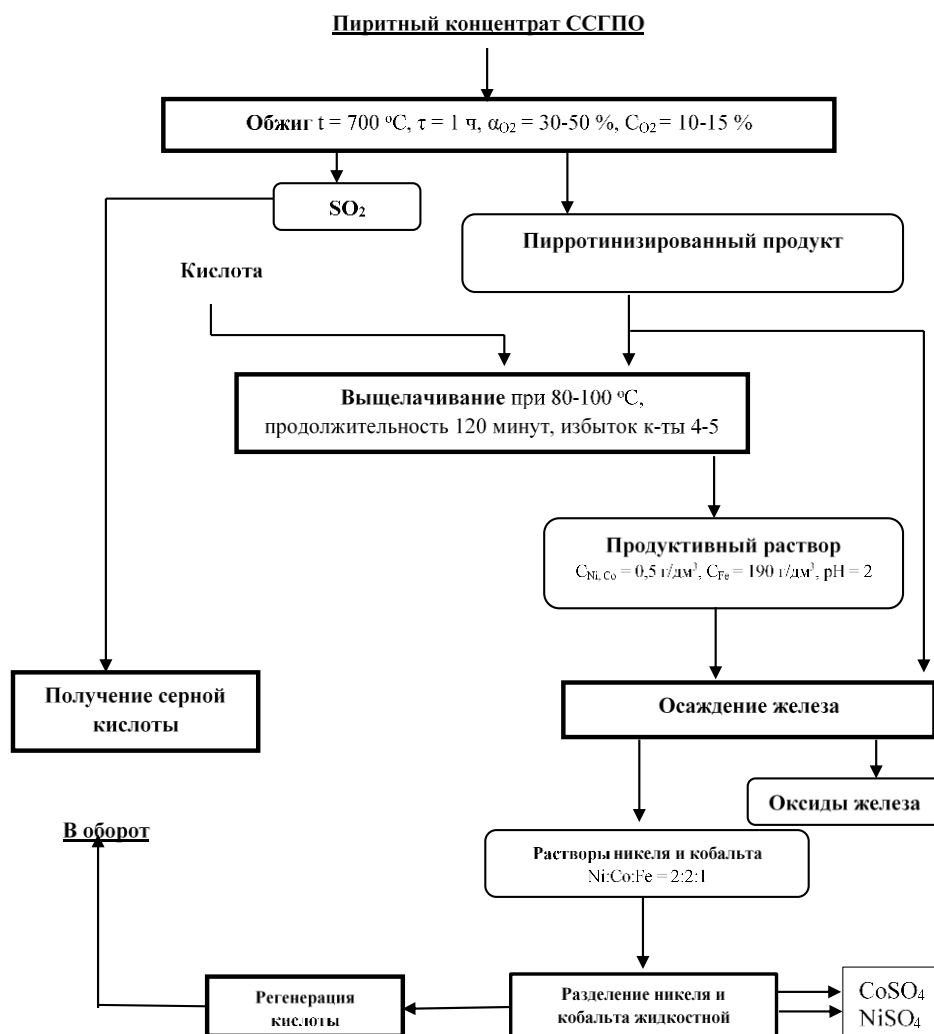


Рисунок 6. Схема комбинированной переработки лежалых никелькобальтсодержащих пиритных хвостов

При обжиге при температуре 700°C с продолжительностью 1 час образуется пирротинизированный продукт, который подвергается сернокислотному выщелачиванию в течение 120 минут, в интервале температур 80-100°C. При выщелачивании с избытком кислоты получен продуктивный раствор с содержанием C_{Ni} , C_{Co} по 0.5 г/л, $C_{Fe} = 190$ г/л, pH = 2.

Укрупненные испытания предлагаемой технологии показали, что в качестве исходного сырья могут использоваться пиритный концентрат и некоторые промпродукты металлургического производства. При выщелачивании огарка пиритного концентрата серной кислотой в раствор селективно извлекаются железо (до 190 г/дм³), никель и кобальт (по 0.5 г/дм³). Железо осаждается в виде гидроксида и из которого можно извлекать чистый порошок Fe₂O₃. Никелькобальтсодержащий раствор после очистки от железа поступает в узел жидкостной экстракции, где достигается селективное разделение кобальта и никеля с получением чистых растворов сульфатов никеля и кобальта.

4. Выводы

Для переработки никелькобальтсодержащих концентратов, получаемых при обогащении хвостов магнитной сепарации ССГПО приемлем комбинированный способ переработки, включающий предварительный обжиг и выщелачивание ценных компонентов.

Термодинамический анализ показал:

- при условиях термической обработки (600-700°C) возможно образование низкосернистых соединений железа широкого спектра составов, а также сульфидов кобальта и никеля переменного состава.

- о возможности в интервале pH 0-8 сернокислотного растворения никеля и кобальта из смеси сульфидов никеля, кобальта и железа входящих в состав из огарка.

Исследованиями сернокислотного выщелачивания огарков установлено, что при выщелачивании в раствор переходят ионы железа, никеля, кобальта и оптимальными условиями являются: концентрация кислоты 100 г/дм³, температура 100°C и соотношения Т:Ж=1:2, продолжительность выщелачивания 120 минут, степень извлечения металлов при таких условиях составляет, %: никель – 93.01; кобальт – 91.49; железо – 64.46. Полученный в результате выщелачивания получен продуктивный раствор состава, г/дм³: 187 г/дм³ железа, 0.50 никель, 0.47 г/дм³.

Разработана технологическая схема переработки пиритных концентратов с выделением железа, никеля и кобальта в виде отдельных продуктов с применением процессов термического обжига пиритного концентрата, выщелачивания и селективного разделения металлов процессами осаждения и жидкостной экстракции.

References

- [1] Yue, L., Zhouliang, T., Yuming, L., Changlong, L., Peipei, H., Jingyi, L. (2024). Past, present and future of high-nickel materials. *Nano Energy*, (119), 2211-2855. <https://doi.org/10.1016/j.nanoen.2023.109070>
- [2] Giridhar, G., Ajoy, K. P. (2023). Recent developments in nickel-based superalloys for gas turbine applications: Review. *Journal of Alloys and Compounds*, (963), 0925-8388. <https://doi.org/10.1016/j.jallcom.2023.171128>
- [3] Norgate, T., Jahanshahi, S. (2009). Low Grade Ores – Smelt, Leach or Concentrate? *Minerals Engineering*, (23), 65-73. <https://doi.org/10.1016/j.mineng.2009.10.002>
- [4] Edgar, P., Arthur, B., Asim, T. (2011). Nickeliferous pyrrhotite – “Waste or resource?”. *Minerals Engineering*, 24(7), 625-637. <https://doi.org/10.1016/j.mineng.2010.10.004>
- [5] McDonald, R.G., Whittington, B.I. (2008). Atmospheric acid leaching of nickel laterites review part I. Sulphuric acid technologies. *Hydrometallurgy*, (91), 35-55. <https://doi.org/10.1016/j.hydromet.2007.11.009>
- [6] Gavrilov, A.S., Krashenin, A.G., Krashenin, A.G., Petrova S.A., Reutov, D.S. (2022). Extraction of Nickel from Oxidized Nickel Ores by Heap Leaching. *Metallurgist*, 66(5-6), 593 – 604. <https://doi.org/10.1007/s11015-022-01364-5>
- [7] Jennifer, M.C., Ataollah, N., William, S., Jonas, A-M. (2016). Atmospheric acid leaching mechanisms and kinetics and rheological studies of a low grade saprolitic nickel laterite ore. *Hydrometallurgy*, (160), 26-37. <https://doi.org/10.1016/j.hydromet.2015.11.004>
- [8] Luo, W., Feng, Q., Ou, L., Zhang, G., Chen, Y. (2010). Kinetics of saprolitic laterite leaching by sulphuric acid at atmospheric pressure. *Minerals Engineering*, 23(6), 458-462. <https://doi.org/10.1016/j.mineng.2009.10.006>
- [9] Xuheng, L., Jiahao, H., Zhongwei, Z., Xingyu, C., Jiangtao, L., Lihua, H. (2023). Nickel leaching kinetics of high-grade nickel matte with sulfuric acid under atmospheric pressure. *Hydrometallurgy*, (215), 105987. <https://doi.org/10.1016/j.hydromet.2022.105987>
- [10] Van, Sc. F., Eksteen, J., Petersen, J., Thyse, E., Akdogan, G. (2011). An experimental evaluation of the leaching kinetics of PGM-containing Ni–Cu–Fe–S Peirce Smith converter matte, under atmospheric leach conditions. *Minerals Engineering*, (24), 524-534. <https://doi.org/10.1016/j.mineng.2010.10.012>
- [11] Kaya, Ş., Topkaya, Y.A. (2011). High pressure acid leaching of a refractory lateritic nickel ore. *Mineral Engineering*, (24), 1188-1197. <https://doi.org/10.1016/j.mineng.2011.05.004>
- [12] Saykova, S.V., Panteleeva, M.V., Saykova, D.I. (2019). Cation exchange processing of buruktal oxidized nickel ore autoclave solutions September. *Tsvetnye Metally*, (9). <https://doi.org/10.17580/tsm.2019.09.02>
- [13] Elsayed, O., Zixian, D., Huan, L., Jacques, E. (2023). Selective extraction of nickel and cobalt from disseminated sulfide flotation cleaner tailings using alkaline glycine-ammonia leaching solutions, *Minerals Engineering*, (204), 108418. <https://doi.org/10.1016/j.mineng.2023.108418>
- [14] Elsayed, O., Huan, L., Zixian, D., Jacques, E. (2023). Selective extraction of Ni and Co from a pyrrhotite-rich flotation slime using an alkaline glycine-based leach system. *Minerals Engineering*, (203), 108330. <https://doi.org/10.1016/j.mineng.2023.108330>
- [15] Anna, Szymczycha-M. (2011). Kinetics of Mo, Ni, V and Al leaching from a spent hydrosulphurization catalyst in a solution containing oxalic acid and hydrogen peroxide. *Journal of Hazardous Materials*, 186(2–3), 2157-2161. <https://doi.org/10.1016/j.jhazmat.2010.11.120>
- [16] Chuan-lin, F., Bin-chuan, L., Yan, F., Xiu-jing, Z. (2010). Kinetics of acid-oxygen leaching of low-sulfur Ni-Cu matte at atmospheric pressure. *Transactions of Nonferrous Metals Society of China*, 20, 6, 1166-1170. [https://doi.org/10.1016/S1003-6326\(09\)60273-9](https://doi.org/10.1016/S1003-6326(09)60273-9)
- [17] Ivanov, N.S., Malimbayev, M.S., Abilmagzhanov, A.Z., Kholkin, O.S. Adelbayev, I.Ye. (2022). Processing of oxidized nickel ores using sintering, roasting and leaching processes. *Mineral Engineering*, (181), 107498. <https://doi.org/10.1016/j.mineng.2022.107498>
- [18] Yongwei, W., Xuejie, C., Mengjun, C., Wenqing, Q., Junwei, Han. (2023). Effective extraction of nickel and cobalt from sintered nickel alloy via reduction roasting and leaching. *Minerals Engineering*, (203), 108336. <https://doi.org/10.1016/j.mineng.2023.108336>

- [19] Rory, A. C., Rolando, L., Yves, Th.t, Lucie, M., W. Douglas, G. (2021). Stirred-tank bioleaching of nickel and cobalt from pyrrhotite-rich tailings from Sudbury, Ontario. *Hydrometallurgy*, (204), 105592. <https://doi.org/10.1016/j.hydromet.2021.105592>
- [20] Kolmachikhina, O.B., Lobanov, V.G., Polygalov, S.E., Makovskaya O.Yu. (2021). Use of thermochemistry methods when processing oxidized nickel ores. *Tsvetnye Metally*, (8), 33-38. <https://doi.org/10.17580/tsm.2021.08.05>
- [21] Wang, C., Yongqianga, C. (2022). Crystallization and pyrolysis of nitric acid pressure leach liquor of limonitic laterite and separation of valuable metals. *Separation and Purification Technology*, (301), 121987. <https://doi.org/10.1016/j.seppur.2022.121987>
- [22] Chepushtanova, T.A., Mamyrbayeva, K.K., Luganov, V.A., Mishra, Brajendra. (2012). Mechanism of nonoxidizing and oxidative pyrrhotite leaching. *Minerals and Metallurgical Processing*, (29), 159-164. <https://doi.org/10.1007/BF03402254>

Магнитті байыту қалдықтарынан никель мен кобальтты бөліп алуды зерттеу

К.К. Мамырбаева¹, А.Н. Куандыкова¹, Т.А. Чепуштанова¹, Е.С. Меркибаев^{1*}, М. Бражендра²

¹Satbayev University, Алматы, Қазақстан

²Вустер политехникалық институты, Вустер, АҚШ

*Корреспонденция үшін автор: y.merkibayev@satbayev.university

Андатпа. Магнитті байыту қалдықтарды өңдеу мәселесі өте ірі әлемдік мәселе болып табылады және одан экономикалық құнды металдарды өндіру басты міндет болып табылады. Қазақстанда байыту қалдықтарынан никель мен кобальтты бөліп нарығы іс жүзінде дамымаған. Бірақ жыл сайын никель мен кобальтқа деген қажеттілік никель-кобальтты батареяларға, электромобильдер, арнайы қорытпалар және т.б. жасау үшін жоғары сұранысқа байланысты артып келеді. Соколов-Сарыбай тау-кен байыту комбинатының никель-кобальтты пирит концентраты темір, никель, кобальт және т.б. сияқты бірқатар бағалы түсті металдарды алудың құнды көзі болып табылады. Зерттеудің мақсаты – күкірт қышқылы ерітінділерін пайдалана отырып, Соколов-Сарыбай байыту комбинатының термиялық өңделген пирит концентратынан никель мен кобальтты бөліп алудың оңтайлы шарттарын зерттеу болып табылды. Пирит концентратының негізгі компоненттерінің тотығу реакцияларының термодинамикалық талдауы жоғары темір, никель және кобальт сульфидтерінің термиялық ыдырауында сәйкесінше $\text{Fe}_{0,877}\text{S}$, FeS , Fe_2S_3 , Fe_7S_8 , Ni_3S_2 , Ni_3S_4 және $\text{CoS}_{0,89}$, CoS стехиометриялық емес төменгі сульфидтердің қатары түзілетінін көрсетті. $\text{Ni-S-H}_2\text{O}$, $\text{Co-S-H}_2\text{O}$ және $\text{Fe-S-H}_2\text{O}$ жүйелерінің Пурбэ диаграммалары термиялық ыдыраған пирит концентратынан кобальт пен никельді күкірт қышқылымен шаймалау рН 0 – 1.5 және $E > -0.5$ В кезінде мүмкін екендігін көрсетеді. $\text{FeS-Fe}_7\text{S}_8$ стехиометриялық емес төменгі темір сульфидтерін шаймалау рН 0 – 4.0 және $E > 0$ В кезінде мүмкін болатындығы көрсетілді. Термиялық өңделген пирит концентраттарын шаймалаудың оңтайлы жағдайларын анықтау бойынша зерттеулер никель мен кобальтты бөліп алу үшін күкірт қышқылының тиімді концентрациясы болып 100 г/дм^3 , шаймалау уақыты 120 минут, температура $100\text{--}110^\circ\text{C}$ болатыны анықталды. Осындай жағдайда никель және кобальттың максималды бөлінуі сәйкесінше 93.01% және 91.49% құрады. Қышқыл концентрациясын, шаймалау ұзақтығын және температураны арттыру темірдің толық еруіне әкелді. Ұқсас шикізатты өңдеу үшін жалған пирит құйрықтарын өңдеудің аралас әдісін қолдануға болады. Никель-кобальтқұрамды ескірген пирит қалдықтарын өңдеудің құрамдас әдісін осы шикізатқа ұқсастарды өңдеу үшін қолдануға болады.

Негізгі сөздер: шаймалау, никель, кобальт, экстракция дәрежесі, күкірт қышқылы, ортаның қышқылдығы.

Исследование извлечения никеля и кобальта из хвостов магнитного обогащения

К.К. Мамырбаева¹, А.Н. Куандыкова¹, Т.А. Чепуштанова¹, Е.С. Меркибаев^{1*}, М. Бражендра²

¹Satbayev University, Алматы, Казахстан

²Вустерский политехнический институт, Вустер, США

*Автор для корреспонденции: y.merkibayev@satbayev.university

Аннотация. Проблема переработки лежалых хвостов является мировой, и основная задача – это извлечение экономически ценных металлов. В Казахстане рынок извлечения никеля и кобальта из лежалых хвостов практически не развит. А потребности в никеле и кобальте ежегодно возрастает в связи с высоким спросом на никель-кобальтовые батареи для изготовления электромобилей, специальных сплавов и другие. Пиритный концентрат, содержащий никель-кобальт Соколовско-Сарбайского ГПО является ценным источником извлечения ряда ценных цветных металлов, таких как железо, никель, кобальт и др. Целью исследования явилась изучение оптимальных условий извлечения никеля и кобальта из термически разложенного пиритного концентрата Соколовско-Сарбайского ГПО растворами серной кислоты. Термодинамический анализ реакций окисления основных компонентов пиритного концентрата показал, что при термическом разложении высших сульфидов железа, никеля и кобальта образуется ряд нестехиометрических

низших сульфидов $\text{Fe}_{0.877}\text{S}$, FeS , Fe_2S_3 , Fe_7S_8 ; Ni_3S_2 , Ni_3S_4 и $\text{CoS}_{0.89}$, CoS соответственно. Диаграммы Пурбэ систем $\text{Ni-S-H}_2\text{O}$, $\text{Co-S-H}_2\text{O}$ и $\text{Fe-S-H}_2\text{O}$ показывают, что сернокислотное выщелачивание кобальта и никеля из термически разложенного пиритного концентрата возможно при $\text{pH } 0 - 1.5$ и $E > -0.5 \text{ В}$. Выщелачивание нестехиометрических низших сульфидов железа $\text{FeS-Fe}_7\text{S}_8$ возможно при $\text{pH } 0 - 4.0$ и $E > 0 \text{ В}$. Исследованиями по определению оптимальных условий выщелачивания термически обработанных пиритных концентратов установлено, что для извлечения никеля и кобальта эффективной концентрацией серной кислоты является 100 г/дм^3 , продолжительность 120 минут и температура 100°C и при этом максимальное извлечение металлов составляет 86.71% и 93.01% соответственно. Повышение концентрации кислоты, продолжительности и температуры приводит к повышению растворения железа из сульфидов. Комбинированный способ переработки лежалых пиритных хвостов может быть применен для переработки аналогичного сырья.

Ключевые слова: выщелачивание, никель, кобальт, степень извлечения, серная кислота, кислотность среды.

Received: 02 April 2024

Accepted: 15 October 2024

Available online: 31 October 2024

Hydrochemical processing of fine kaolinite fraction of high-siliceous bauxite with preliminary chemical activation

S.V. Gladyshev, S.B. Dyussenova, A.I. Bakhshyan, L.M. Imangaliyeva*, Ye.B. Abikak

Institute of Metallurgy and Ore Beneficiation, Almaty, Kazakhstan

*Corresponding author: Leila.imangalieva@mail.ru

Abstract. For processing of low-quality bauxite, it is impossible to use the most simple and economical Bayer hydroalkali method. In spite of the fact that there are various hydrochemical methods allowing to use substandard alumina-containing raw materials the problem of technology improvement is actual. In this work we investigated the possibility of processing kaolinite fraction of bauxite by hydrochemical method, by improving it through preliminary chemical activation and use of active form of calcium oxide during leaching in high-modulus recycled aluminate solution. The developed technology allows to extract aluminum into solution with high efficiency, to regenerate recycled leaching solutions and to obtain waste sludge suitable for construction. Preliminary chemical activation of fine crystalline fraction by thermochemical treatment in sodium hydrogen carbonate solution at elevated pressure allowed to transform the initial phase composition, eliminate the kaolinite phase, which is difficult to detect by hydrochemical method. The developed method of obtaining the active form of calcium oxide by CaO quenching in Na₂SO₄ solution at elevated temperature and pressure made it possible to carry out hydrochemical stripping of fine crystalline fraction in one stage. The conducted studies have shown the possibility of effective processing of kaolinite fraction of gibbsite-kaolinite bauxite by hydrochemical method by leaching in high-modulus aluminate solution with addition of active form of calcium oxide, after changing the initial phase composition by the method of preliminary chemical activation in sodium hydrogen carbonate solution.

Keywords: bauxite, kaolinite, dawsonite, chemical activation, hydrochemistry, sodium hydrogen carbonate, fraction, transformation, calcium oxide.

1. Введение

Производство алюминия представляет собой основу ведущих секторов промышленности и обеспечивает стабильный рост любой национальной экономики [1]. Однако, многие районы мира имеют ограниченные запасы качественных бокситов, пригодных для переработки простым и эффективным способом Байера, поэтому в производство вовлекаются низкокачественное алюминийсодержащее сырье, что требует разработки новых технологических решений [2-4].

Для эффективной переработки низкокачественных гиббсит – каолиновых бокситов Красногорского месторождения требуется стадийное обогащение с гравитационным отделением неперерабатываемой каолиновой фракции и химическом удалении части избыточного кремнезема. Гиббсит – каолиновые бокситы содержат 50-60% глинистой каолиновой фракции, которая приводит к высоким затратам при добычи бокситового сырья, его измельчения и гравитационном обогащении.

Наиболее простым и дешевым способом переработки бокситов является способ Байера, однако для него требуется бокситы с высоким кремниевым модулем (определяется отношением оксида алюминия к оксиду кремния) >7 [5]. Низкокачественные бокситы имеют кремниевый модуль 3-4 и поэтому первоначально их подвергают механическому и химическому обогащению в несколько стадий [5-8].

В результате механического – гравитационного и химического обогащения низкокачественные бокситы переводят в категорию, пригодную для переработки по способу Байера. Выделенная, мелкодисперсная каолиновая фракция не перерабатывается и подвергается захоронению, из-за отсутствия эффективной технологии ее переработки.

Анализ научно – технической информации показывает, что извлечение алюминия из каолиновой фракции боксита невозможно обычным щелочным гидрометаллургическим способом, так как каолин является химическим стойким соединением. В настоящее время при переработке каолиновых руд преимущественно ориентируются на использование кислотных способов, недостатком, которых является необходимость использования дорогостоящего, коррозионностойкого оборудования [3, 10, 11].

При использовании щелочных методов переработки каолиновых руд для повышения реакционной способности каолинита проводят предварительную операцию, связанную с трансформацией фазового состава путем термической обработки – методом спекания, для превращения каолина в метакаолин, из которого легко можно выщелочить глинозем [12-18]. Недостатком термической трансформации каолиновых руд является высокая энергоемкость процесса.

В Казахстане отсутствуют высококачественные бокситы, что вызывает необходимость использовать в настоящее время, на Павлодарском алюминиевом заводе (ПАЗ)

АО «Алюминий Казахстана» в производстве по последовательному способу Байер-спекание бокситы Красногорского месторождения, которые отличаются низким кремниевым модулем. Бокситы подвергают предварительному обогащению с отделением глинистой каолининовой фракции [5]. Глинистая фракция не перерабатывается и является отходом, в то же время ее переработка может служить источником получения дополнительного количества глинозема и быть источником сырья для востребованной силикатной продукции. Это обстоятельство позволило бы увеличить объем глиноземного производства ПАЗа, повысить его рентабельность и рационально использовать природные ресурсы.

Для разработки эффективной технологии, переработки каолининовой фракции бокситов Красногорского месторождения в работе проведены исследования технологии включающей применение метода предварительной химической активации для щелочного вскрытия с добавлением активной формы оксида кальция и регенерации растворов выщелачивания позволяющих осуществлять гидрохимическую переработку с получением глинозема и силикатной продукции.

2. Материалы и методы

Рентгенофлуоресцентный анализ осуществляли на спектрометре с волновой дисперсией Venus 200 PANalytical B.V. (PANalytical B.V., Голландия).

Химический анализ образцов выполнен на оптическом эмиссионном спектрометре с индуктивно – связанной плазмой Optima 2000 DV (США, PerkinElmer).

Рентгенофазовый анализ проведен на аппарате BRUKERD8 ADVANCE на медном излучении при ускоряющем напряжении 36 кВт, токе 25 мА.

Микрофотографии были сделаны на растровом низковокумном электронном микроскопе с термоэмиссионным катодом (LaB₆) JSM-6610LV фирмы «JEOL».

Химическую активацию МКФ проводили, путем термохимической обработки [19] в растворе, содержащем 120 г/дм³ NaHCO₃ при температуре 200°C и продолжительностью 60-180 минут.

Гидрохимическое выщелачивание МКФ после химической активации проводили с добавлением активной формы оксида кальция в высокомодульном растворе (ВМР) состава, г/дм³: Na₂O_{к_у} 245.0; Na₂O_{к_б} 11.4; Al₂O₃ 13.43; α_к = 30, при температуре 240°C, продолжительности 4 часа и отношении Ж:Т = 4:1 и отношении CaO/SiO₂ = 1.5.

Активную форму оксида кальция готовили согласно разработанного способа путем получения мелкодисперсного порошка гашеной извести в растворе, содержащем 20 г/дм³ Na₂SO₄ при температуре 200°C и продолжительности 2 часа [20]. Синтез трехкальциевого гидроалюмината (ТКГА) проводили при температуре 100°C в течение 4 часов, при добавлении CaO от стехиометрического количества 100-120% для получения соединения 3CaO·Al₂O₃·6H₂O.

Разложение ТКГА проводили согласно технологии [21] в содовом растворе при концентрации Na₂O_{к_б} – 140-160 г/дм³, температуре 180°C, продолжительности выщелачивания 90 минут в автоклаве и отношении Ж:Т = 4:1. Кристаллооптический анализ сделан с помощью иммерсионного метода на микроскопе марки Leica DM 2500 Р.

Размер частиц отвалного шлама определен на анализаторе Photocor Compact. Для этого была приготовлена водная суспензия (концентрация – 0.005 г/см³). Образец измерялся после 3 минуты перемешивания магнитной мешалкой при обороте 200 об/мин. Микротвердость порошка отвалного шлама определена с помощью микротвердомера «ПМТ-3М».

Расчет извлечения Al₂O₃ и SiO₂ в раствор проводили по формуле:

$$\left(100 - \frac{P_{исх} \cdot C_{исх}}{P_{кон} \cdot C_{кон}}\right) \cdot \% \quad (1)$$

α_{к_у} – каустический модуль;

μ_{Si} – кремниевый модуль;

к_у – каустическая щелочь;

к_б – карбонатная щелочь;

об – общая щелочность.

Каустический модуль определяли из отношения 1.645·Na₂O/Al₂O₃

Кремниевый модуль (μ_{Si}) проб, определяли из отношения Al₂O₃/SiO₂.

3. Результаты и обсуждение

Исходным сырьем для исследований служил мелко-дисперсная фракция (МКФ) гиббсит-каолининовых бокситов Красногорского месторождения Республики Казахстан, выделенная при гравитационном обогащении.

Химический состав МКФ, масс. %: Al₂O₃ 38.8; SiO₂ 19.6; Fe₂O₃ 16.96; CaO 1.45; Na₂O 0.187; MgO 0.26; K₂O 0.06; TiO₂ 3.2; п.п 19.24; μ_{Si} 1.98.

Рентгенофазовый состав МКФ боксита представлен на рисунке 1.

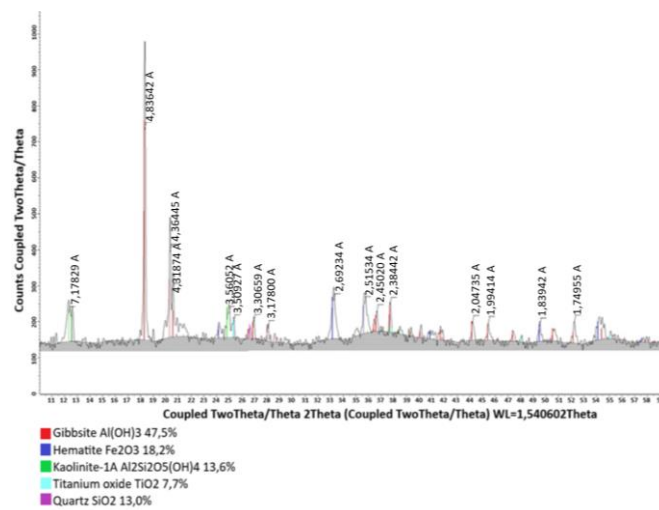


Рисунок 1. Рентгенограмма МКФ

Микрофотография и электронно-микроскопический анализ МКФ представлен на рисунках 2, 3.

Основой технологии гидрохимической переработки мелкодисперсной каолининовой фракции является предварительная химическая активация и выщелачивание в высокомодульном щелочном растворе (ВМР) с добавлением активной формы оксида кальция (рисунок 4). Трудность переработки МКФ связана с содержанием химически стойкой фазы каолинита.

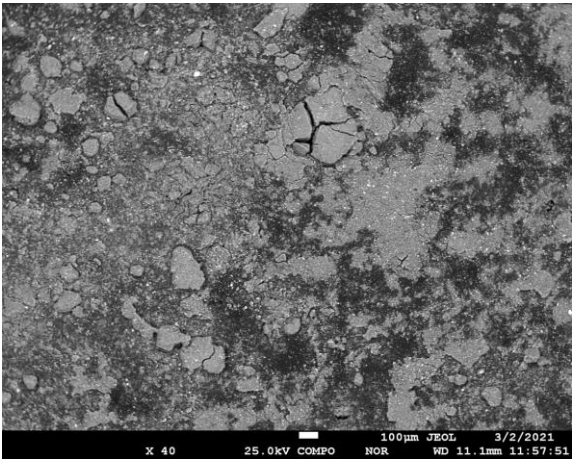


Рисунок 2. Микрофотография МКФх40

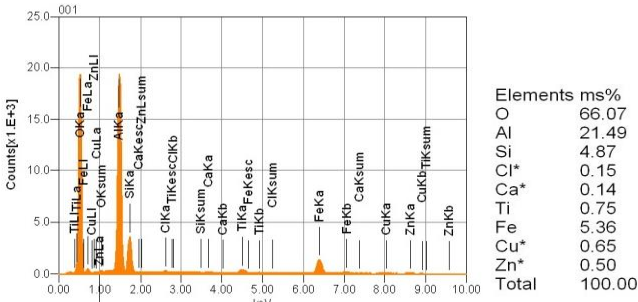
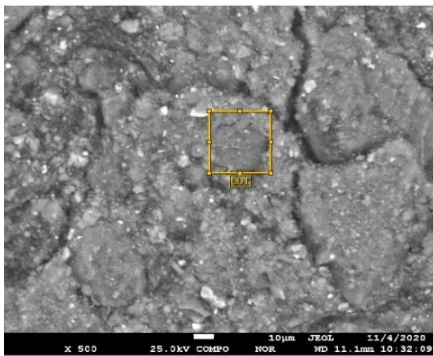


Рисунок 3. Микрофотография и электронно-микроскопический анализ МКФ х500

Каолинитсодержащее сырье перерабатывают либо кислотными методами, либо спеканием, которые требуют дорогостоящего оборудования или энергозатратны.

В проведенных исследованиях для эффективной гидрохимической переработки МКФ использована предварительная химическая активация, целью которой является трансформация исходного фазового состава с получением легкорастворимых алюмосодержащих фаз.

Химическую активацию МКФ проводили согласно способу [22], путем термохимической обработки в автоклаве в растворе NaHCO_3 , при температуре 200°C (таблица 1). Экспериментально установлено, что с уменьшением температуры продолжительность процессов фазовой трансформации МКФ при активации значительно увеличивается, а повышение температуры выше 200°C не приводит к значительному сокращению продолжительности.

Согласно полученным данным в результате химической активации исчезают исходные алюмосодержащие фазы гиббсит и каолинит с образованием даусонита, гидроалюмосиликата натрия и бемита.

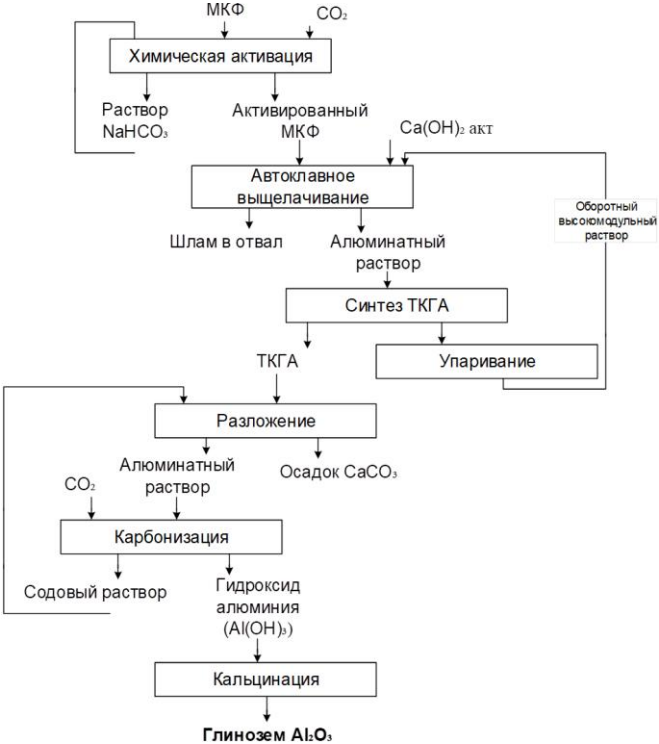


Рисунок 4. Гидрохимическая переработка МКФ с предварительной химической активацией

Таблица 1. Фазовый состав МКФ в зависимости от продолжительности химической активации

Наименование фаз	Содержание фаз МКФ в зависимости от продолжительности, мин					
	исх	30	60	90	120	180
Гиббсит	47.5	40.8	31.2			
Каолинит-1А	13.6	34.9	45.1			
Гематит	18.2	18.2	18.2	5.3	5.1	5.0
Анатаз	7.7	6.1	5.5	4.2	2.3	1.9
Кварц	13.0					
Даусонит				74.2	73.7	44.3
Гидроалюмосиликат натрия				14.3	16.9	41.7
Бемит				2.0	2.0	7.1

Полное исчезновение гиббсита и каолинита происходит при продолжительности 90 минут, дальнейшее увеличение продолжительности приводит к уменьшению содержания даусонита и увеличению содержания фазы гидрокарбоалюмосиликата натрия.

Первоначальное увеличение содержания каолинита при продолжительности активации до 60 h минут можно объяснить, изменением структуры его рентгеноаморфной части, которая изначально не определилась методом рентгенофазового анализа. Исчезновение фазы каолинита в дальнейшем происходит за счет химической реакции с раствором гидрокарбоната натрия.

Химизм процесса химической активации МКФ с исчезновением фаз гиббсита и каолинита отражают уравнения:

$$\text{Al}_2\text{O}_3 \cdot 3\text{H}_2\text{O} + 2\text{NaHCO}_3 = 2\text{NaAlCO}_3(\text{OH})_2 + 2\text{H}_2\text{O} \quad (2)$$
$$3\text{Al}_2\text{O}_3 \cdot 2\text{SiO}_2(\text{OH})_2 + 6\text{NaHCO}_3 + 4\text{SiO}_2 = 3(\text{Na}_2\text{O} \cdot \text{Al}_2\text{O}_3 \cdot 2\text{SiO}_2 \cdot \text{H}_2\text{O}) + 6\text{CO}_2 + 3\text{H}_2\text{O} \quad (3)$$

Химизм процесса химической активации подтверждается рентгенофазовым анализом (рисунок 5).

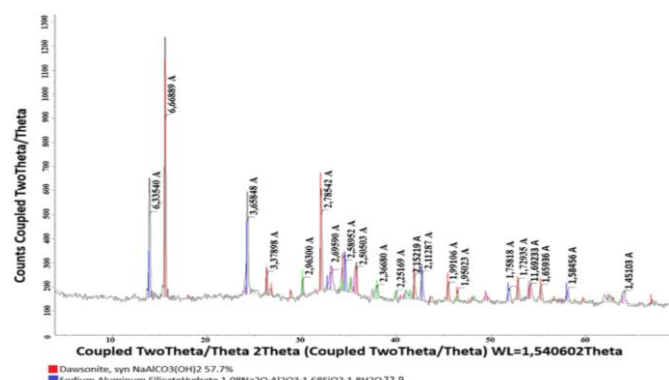


Рисунок 5. Рентгенограмма МКФ после химической активации при продолжительности 90 минут

После предварительной химической активации гидрохимическое выщелачивание МКФ проводили в ВМР с добавлением активной формы оксида кальция. В результате выщелачивания получили отвальный шлак и СМР. Извлечение Al_2O_3 в раствор составило 89.5%.

Химический состав СМР, г/дм³: Na₂O_{ку} 250.1; Na₂O_{кб} 11.2; Al₂O₃ – 38.09; SiO₂ 0.1; α_к = 10.8.

Химический состав отвального шлама, мас. %: Al_2O_3 5.74; SiO_2 18.9; Fe_2O_3 10.3; CaO 28.35; Na_2O 1.1; TiO_2 4.0 и п.п. 31.61.

Рентгенофазовый состав отвалного шлама представлен на рисунке 6.

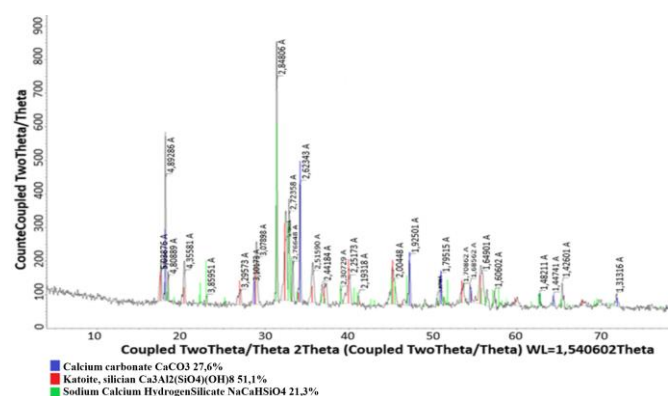
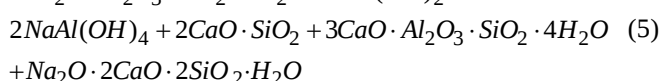
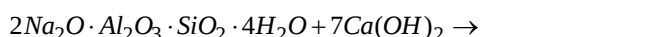
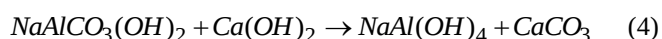


Рисунок 6. Рентгенограмма отвального шлама

Химизм процесса гидрохимического выщелачивания МКФ в ВМР с добавлением активной формы оксида кальция, учитывая результаты рентгенофазового анализа, можно выразить уравнениями:

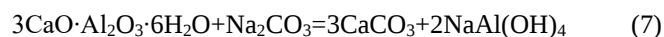


Соединение NaCaHSiO_4 в алюминатном растворе в присутствии Ca(OH)_2 разлагается с образованием катоита [23]. В результате выщелачивания МКФ состоящей после химической активации из даунсонита и гидроалюмосиликата натрия получен алюминат натрия, который переходит в щелочной раствор и отвальный шлам содержащий двухкальциевый силикат, алюминиевый гидрогранат, катоит и кальцит.

СМР переработали по способу синтеза ТКГА и его разложения в содовом растворе. Химизм процесса синтеза ТКГА описывается уравнением:



При содовом разложении ТКГА в системе происходит реакция:



Извлечение Al_2O_3 в ТКГА составило 70.5%, при этом α_k полученного раствора разложения составил 29.5%. После упарки раствор может быть использован в качестве оборотного раствора ВМР для выщелачивания новой порции шлама (рисунок 4).

Химический состав ТКГА, масс. (%): Al_2O_3 - 24.5; CaO - 50.3, п.п – 25.2.

Рентгенофазовый состав ТКГА представлен на рисунке 7. Проведены физико-химические исследования свойств отвалного шлама выщелачивания МКФ который является силикатным продуктом технологии (рисунок 4). Рентгенофазовый состав отвалного шлама представлен на рисунке 8.

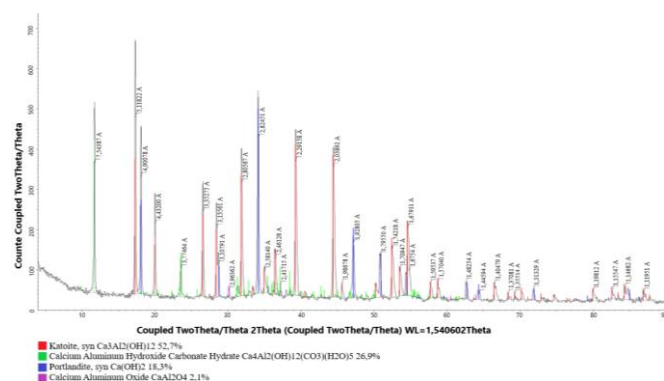


Рисунок 7. Рентгенограмма ТКГА

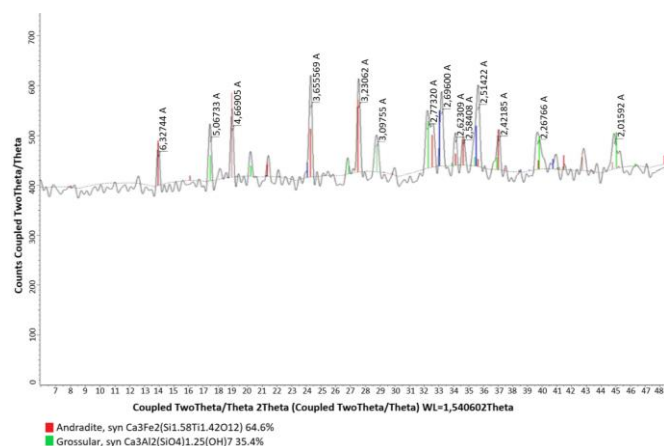


Рисунок 8. Рентгенограмма отвального шлама

Кристаллооптический анализ отвального шлама представлен на рисунке 9.

Отвальный шлам состоит из длиннопризматических кристаллов темного цвета размером 0.1-0.15 мм и крип-токристаллической смеси всех минералов, в виде мелких кругов.

Микрофотографии отвального шлама представлен на рисунках 10-13.

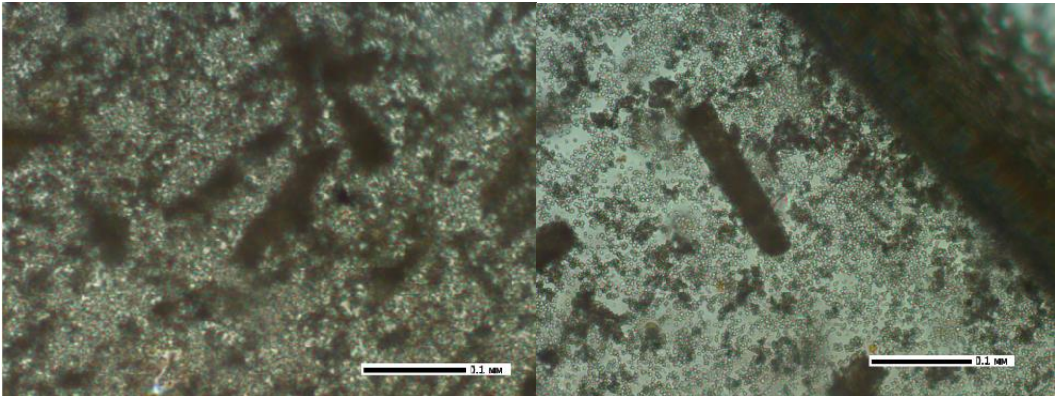


Рисунок 9. Отвальный шлам, x 200

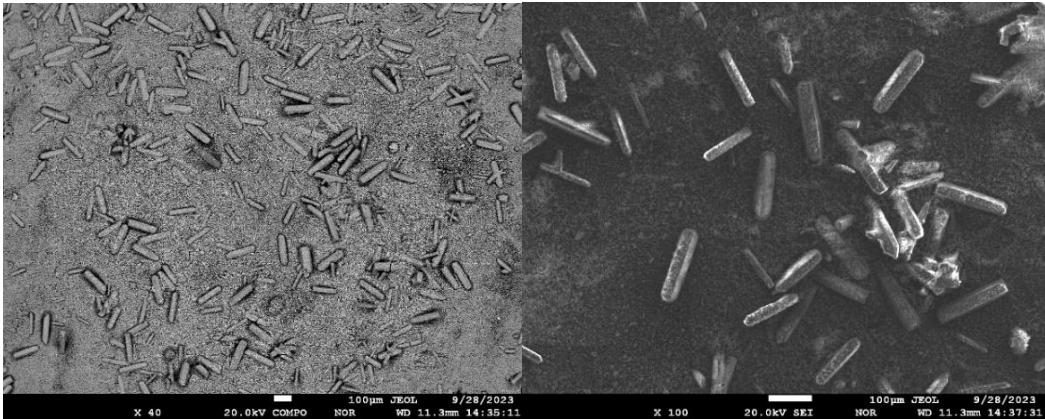


Рисунок 10. Отвальный шлам, x100

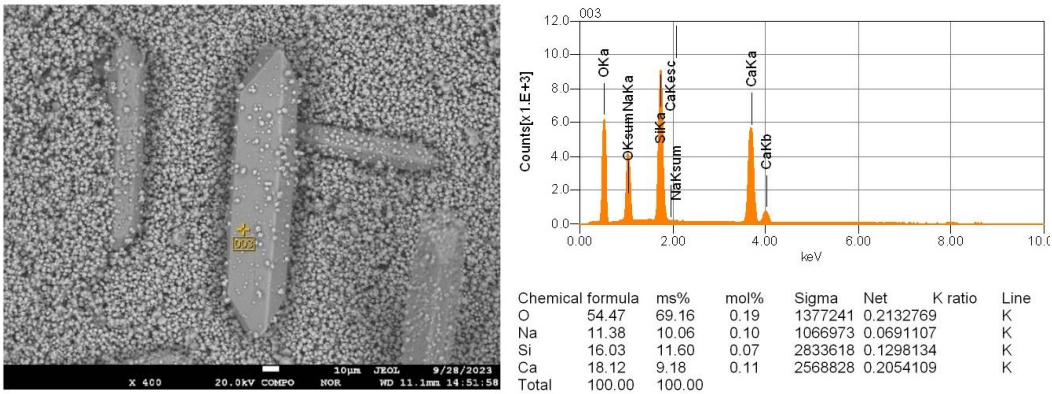


Рисунок 11. Отвальный шлам, x 400

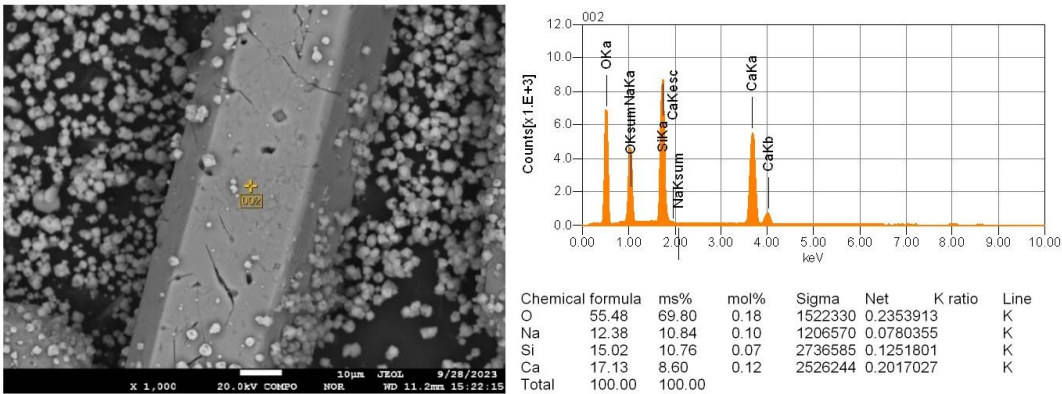


Рисунок 12. Отвальный шлам, x 1000

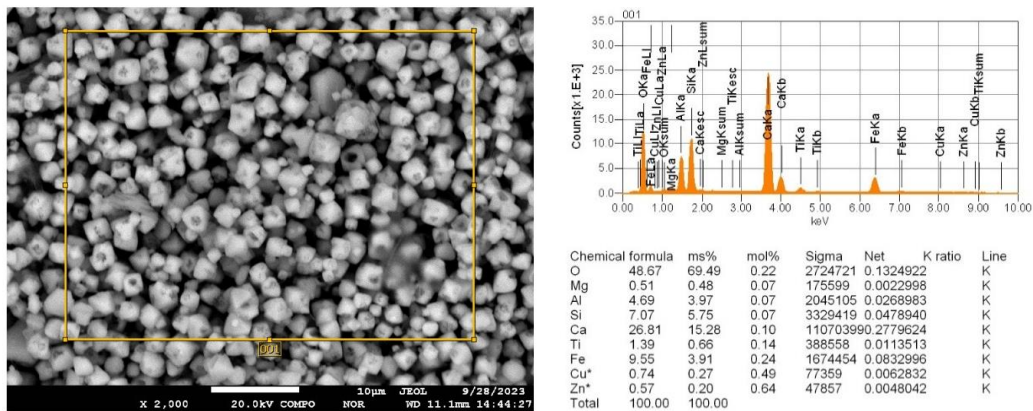


Рисунок 13. Отвальный шлак, х 2000

Диаграмма измерения размера частиц отвального шлака представлен на рисунке 14 и в таблице 2. По результатам снимка, средний размер водной суспензии составил 166.3 нм (0.17 мкм).

Таблица 2. Измерение размера частиц отвального шлака

Пик	Площадь, %	Размер частиц, нм
1	59.7	166.3
2	40.3	1·10 ⁵

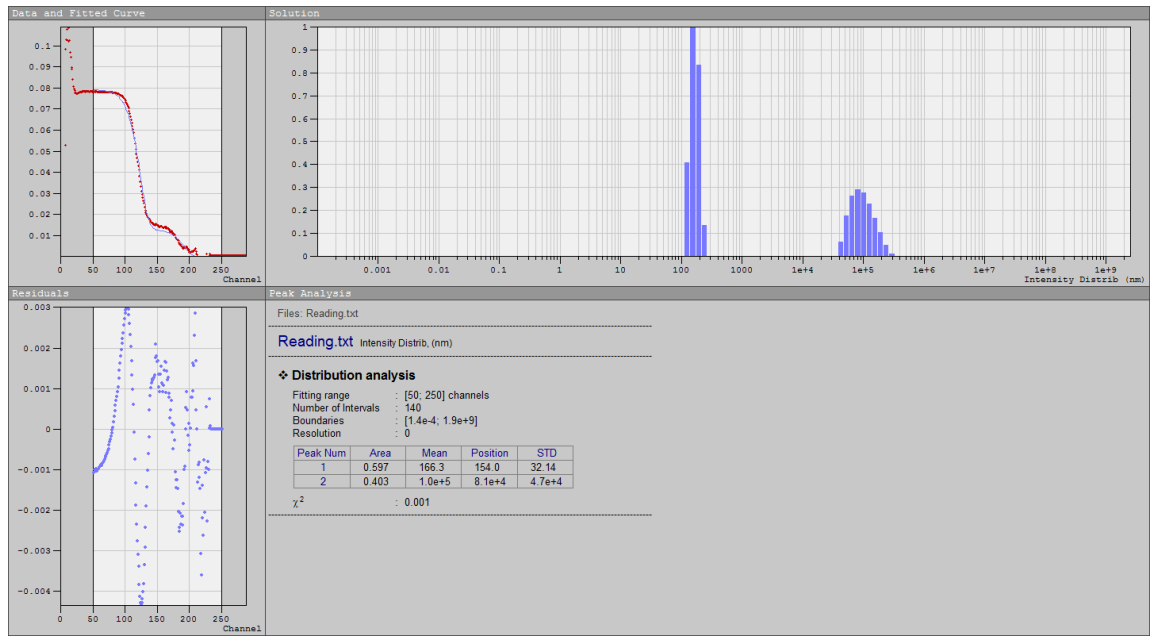


Рисунок 14. Диаграмма измерения размера частиц отвального шлака

В ходе экспериментальных исследований порошка отвального шлака установлены следующие технологические характеристики:

- удельная поверхность, 35.0 м²/г;
- средний массовый размер частиц – криптокристаллическая часть в количестве 59.7% размером 166.3 нм и длиннопризматические кристаллы в количестве 40.3% размером 1·10⁵ нм (0.1-0.15 мм);
- плотность при 20°С, 2.9 г/см³;
- насыпной вес 0.98 г/см³;
- микротвердость по шкале Мооса 5.8;
- цвет темно – коричневый;
- консистенция – тонко дисперсный, мягкий, легко мажущийся порошок.

Из регламентируемых ГОСТом 30108-94 (материалы и изделия строительные) только содержание железа в отвальном шлаке превышает допустимый уровень, то есть полученный силикатный продукт может быть использован во всех видах строительства

4. Выводы

Каолинитовую фракцию гиббсит-каолинитовых бокситов возможно переработать гидрохимическим способом путем выщелачивания в высокомолярном алюминатном растворе с добавлением активной формы оксида кальция, после изменения исходного фазового состава методом предварительной химической активации в растворе гидрокарбоната натрия. Извлечение Al₂O₃ в раствор по разработанной технологии составило 89.5%.

В результате химической активации при температуре 120°С и продолжительности 180 минут произошла трансформация фазового состава: исчезли фазы гиббсита, каолинита и кварца взамен которых образовались фазы даусонита и гидроалюмосиликата натрия.

Разработан способ получения активной формы оксида кальция, включающий гашение CaO в растворе Na₂SO₄ при повышенной температуре и давлении.

Проведены физико-химические исследования отвального шлака выщелачивания МКФ который

является силикатным продуктом технологии, который согласно ГОСТа 30108-94 (материалы и изделия строительные) может быть использован во всех видах строительства.

Финансирование

Работа выполнена при финансовой поддержке КН МОН РК по грантовому финансированию №AP14869208.

References / Литература

- [1] Brichkin, V.N., Kurtenkov, R.V., Jeldib, A.B. & Bormotov, I.S.. (2019). Aljuminij-soderzhashhee syr'jo Egipta i perspektivy ego kompleksnoj pererabotki s polucheniem glinozjoma i poputnoj produkcii. *Cvetnye Metally I Mineraly*, 173-181
- [2] Guo, Y., Yan, K., Cui, L. & Cheng, F. (2016). Improved extraction of alumina from coal gangue by surface mechanically grinding modification. *Powder Technology*, (302), 33-41
- [3] Al-Zahrani, A.A., Abdul-Majid, M.H. (2009). Extraction of alumina from local clays by hydrochloric acid process. *Journal of King Abdulaziz University-Engineering Sciences*, 20(2), 29-41
- [4] ElDeeb, A.B.S., Brichkin, V.N. (2018). Egyptian aluminum containing ores and prospects for their use in the production of Aluminum. *International Journal of Scientific & Engineering*, 9(5), 721-731
- [5] Ibragimov, A.T., Budon, S.V. (2010). Razvitie tehnologii proizvodstva glinozema iz boksitov Kazahstana. *Pavlodar*
- [6] Dubovikov, O.A., Jaskelainen, E.E. (2016). Processing of low-quality bauxite feedstock by thermochemistry-Bayer method. *Zapiski Gornogo instituta*, (221), 668-674. <https://doi.org/10.18454/PMI.2016.5.668>
- [7] Danchuk, K.R., Belousova, N.V. (2019). Pererabotka netracionnyh vidov aljuminij-soderzhashhego syr'ja. *Himicheskie nauki. Sovremennye issledovaniya*, 6 (22)
- [8] Dubovikov, O.A. (2012). Termohimicheskoe kondicionirovanie sostava nizkokache-stvennyh boksitov i ih pererabotka shhelochnymi sposobami: (doctoral dissertation). *Sankt-Peterburg*
- [9] Synkova, L.N., Mihajlova, O.I. & Eremina, M.G. (2004). Sposob pererabotki boksitov. *Patent §13998*
- [10] Suss, A.G., Damaskin, A.A., Senyuta, A.S., Panov, A.V. & Smirnov, A.A. (2014). The influence of the mineral composition of lowgrade aluminum ores on aluminium extraction by acid leaching. *Springer International Publishing*
- [11] Balmaev, B.G., Kirov, S.S., Pak, V.I. & Ivanov, M.A. (2018). Kinetics of high-temperature hydrochloric leaching of kaolin clays of east-siberian deposits in laboratory conditions and pilot plant tests. *Tsvetnye Metally*, (3), 38-45. <https://doi.org/10.17580/tsm.2018.03.06>
- [12] Allegrretta, I., Pinto, D. & Eramo, G. (2016). Effects of grain size on the reactivity of limestone temper in kaolinite clay. *Applied Clay Science*, (126), 223-234
- [13] Dubovikov, O.A., Brichkin, V.N., Ris, A.D. & Sundurov, A.V. (2018). Thermochemical activation of hydrated aluminosilicates and its importance for alumina production. *Non-ferrous Metals*, (2), 3-15. <https://doi.org/10.17580/nfm.2018.02.02>
- [14] Guo, Y., Yan, K., Cui, L., Cheng, F. & Lou, H.H. (2014). Effect of Na₂CO₃ additive on the activation of coal gangue for alumina extraction. *International Journal of Mineral Processing*, (131), 51-57
- [15] Tang, A., Su, L., Li, C. & Wei, W. (2010). Effect of mechanical activation on acid-leaching of kaolin residue. *Applied Clay Science*, (48), 296-299
- [16] Kuang, J., Yuan, W., Li, L., Hu, J. & Xu, L. (2016). Effects of Er(NO₃)₃, Nd(NO₃)₃ and Y(NO₃)₃ on kinetics of dehydroxylation of kaolinite. *Powder Technology*, (301), 581-589
- [17] Souiri, A., Golestani-Fard, F., Naghizadeh, R. & Veisheh, S. (2015). An investigation on pozzolanic activity of Iranian kaolins obtained by thermal treatment. *Applied Clay Science*, (103), 34-39
- [18] ElDeeb, A.B., Brichkin, V.N., Kurtenkov, R.V. & Bormotov, I.S. (2019). Extraction of Alumina from Kaolin: a Comparative Study of Pyrometallurgical and Hydrometallurgical Processes. *Applied Clay Science*, (172), 146-154. <https://doi.org/10.1016/j.clay.2019.03.008>
- [19] Gladyshev, S.V., Kenzhaliev, B.K., Abikak, E.B., Ahmadiyeva, N.K., Djusenova, S.B., Manapova, A.I. & Bahshjan, A.I. (2023). Sposob pererabotki vysokokremnistyh aljuminievyyh rud. *Zajavka §2023/0811.2*
- [20] Bekturganov, N.S., Myltykbaeva, L.A., Tastanov, E.A., Abdulvaliev, R.A., Gladyshev, S.V. & Bejsembekova, K.O. (2015). Sposob gidrogranatovoj pererabotki krasnogo shlama. *Patent RK §27264*
- [21] Gladyshev, S.V., Abdulvaliev, R.A., Kovzalenko, V.A., Bejsembekova, K.O., Kvjatkovskaja, M.N. & Akchulakova, S.T. (2012). Razrabotka tehnologii razlozheniya trehkal'cievogo gidroalju-minata shhelochnym, sodovym i sodo-shhelochnymi rastvorami. *Komplexnoe ispolzovanie mineral'nogo syr'a*, (2), 30-35
- [22] Abdulvaliev, R.A., Gladyshev, S.V., Pozmogov, V.A. & Imangalieva, L.M. (2017). Sposob podgotovki aljunosilikatnogo syr'ja perez vyshhelachivaniem. *Patent RK §32333*
- [23] Shaowei You, Yifei Zhang, Fangfang Chen, Shaotao Cao, Yi Zhang. (2014). Transformation of NaCaHSiO₄ to sodalite and katoite in sodium aluminate solution. *Hydrometallurgy*, (141), 43-48. <https://doi.org/10.1016/j.hydromet.2013.10.004>
- [24]

Алдын ала химиялық белсендірілген жоғары кремнийлі бокситтің ұсақ дисперсті каолинит фракциясын гидрохимиялық өңдеу

С.В. Гладышев, С.Б. Дюсенова, А.И. Бахшян, Л.М. Имангалиева*, Е.Б.Абиқақ

Металлургия және кен байыту институты, Алматы, Қазақстан

*Корреспонденция үшін автор: Leila.imangalieva@mail.ru

Андатпа. Төмен сапалы бокситтерді қайта өңдеу үшін Байердің ең қарапайым және үнемді гидросілтілік әдісін қолдану мүмкін емес. Құрамында алюминий бар шикізатты қолдануға мүмкіндік беретін әртүрлі гидрохимиялық әдістер бар екеніне қарамастан, технологияны жетілдіру мәселесі өзекті болып табылады. Жұмыста бокситтің каолинит фракциясын алдын-ала химиялық белсендірумен гидрохимиялық әдіспен қайта өңдеу мүмкіндігі және жоғары модульді айналымды алюминий ерітіндісінде сілтілеу кезінде кальций оксидінің белсенді түрін қолдану

арқылы жетілдіру арқылы зерттелді. Әзірленген технология алюминийді ерітіндіге жоғары тиімділікпен шығаруға, қайта өңделген сілтілеу ерітінділерін қалпына келтіруге және құрылысқа жарамды үйінді шламын алуға мүмкіндік береді. Жоғары қысымда натрий гидрокарбонатының ерітіндісінде термохимиялық өңдеу арқылы ұсақ кристалды фракцияның алдын ала химиялық белсендіруі бастапқы фазалық құрамды өзгертуге, қиын каолинит фазасын гидрохимиялық жолмен ашылуын жоюға мүмкіндік берді. Жоғары температура мен қысымда Na_2SO_4 ерітіндісіндегі CaO -ны сөндіру арқылы кальций оксидінің белсенді түрін алудың әзірленген әдісі ұсақ кристалды фракцияны бір сатыда гидрохимиялық ашуға мүмкіндік берді. Жүргізілген зерттеулер гиббсит-каолинит бокситтерінің каолинит фракциясын натрий гидрокарбонаты ерітіндісінде алдын ала химиялық белсендіру әдісімен бастапқы фазалық құрамын өзгерткеннен кейін кальций оксидінің белсенді түрін қосып, жоғары модульді алюминий ерітіндісінде шаймалау арқылы гидрохимиялық тәсілмен тиімді өңдеу мүмкіндігін көрсетті.

Негізгі сөздер: боксит, каолинит, даусонит, химиялық белсендіру, гидрохимия, натрий гидрокарбонаты, фракция, трансформация, кальций оксиді.

Гидрохимическая переработка мелкодисперсной каолинитовой фракции высококремнистого боксита с предварительной химической активацией

С.В. Гладышев, С.Б. Дюсенова, А.И. Бахшян, Л.М. Имангалиева*, Е.Б.Абикак

Институт металлургии и обогащения, Алматы, Казахстан

*Автор для корреспонденции: Leila.imangalieva@mail.ru

Аннотация. Для переработки низкокачественных бокситов невозможно использование наиболее простого и экономичного гидрощелочного способа Байера. Несмотря на то, что, существуют различные гидрохимические способы позволяющие использовать некондиционное глиноземсодержащее сырье проблема совершенствования технологий является актуальной. В работе исследована возможность переработки каолинитовой фракции боксита гидрохимическим способом, путем его совершенствования за счет проведения предварительной химической активации и использования активной формы оксида кальция при выщелачивании в высокомодульном обратном алюминатном растворе. Разработанная технология позволяет с высокой эффективностью извлекать алюминий в раствор, регенерировать оборотные растворы выщелачивания и получать отвальный шлам пригодный для строительства. Предварительная химическая активация мелкокриталлической фракции путем термохимической обработки в растворе гидрокарбоната натрия при повышенном давлении позволило трансформировать исходный фазовый состав, устранить трудновскрываемую гидрохимическим способом фазу каолинита. Разработанный способ получения активной формы оксида кальция методом гашения CaO в растворе Na_2SO_4 при повышенных температуре и давлении позволил осуществить гидрохимическое вскрытие мелкокриталлической фракции в одну стадию. Проведенные исследования показали возможность эффективной переработки каолинитовой фракции гиббсит-каолинитовых бокситов гидрохимическим способом путем выщелачивания в высокомодульном алюминатном растворе с добавлением активной формы оксида кальция, после изменения исходного фазового состава методом предварительной химической активации в растворе гидрокарбоната натрия.

Ключевые слова: боксит, каолинит, даусонит, химическая активация, гидрохимия, гидрокарбонат натрия, фракция, трансформация, оксид кальция.

Received: 01 February 2024

Accepted: 15 October 2024

Available online: 31 October 2024

<https://doi.org/10.51301/ejsu.2024.i5.03>

Electron microscopy of non-monocrystalline magnetron sputtered silicon thin films containing fibrous nanosilicon

K. Tolubaev¹, B. Zhautikov¹, N. Zobnin^{1*}, G. Dairbekova², S. Kabieva¹, Riad-Taha Al-Kasasbeh³

¹Karaganda Industrial University, Temirtau, Kazakhstan

²Satbayev University, Almaty, Kazakhstan

³University of Jordan, Amman, Jordan

*Corresponding author: zobninnn@mail.ru

Abstract. The article examines the features of the microstructure of a new type of silicon film, based on a previously unstudied form of nanosilicon, obtained by magnetron sputtering. Microstructural analysis was carried out using a Jeol JSM-6490LA scanning electron microscope, a JEM2100 transmission electron microscope, and a Ntegra atomic force microscope (AFM) Therna. Raman spectroscopic analysis of silicon films was carried out on a Horiba system Jobin – Yvon HR800UV (France). It has been established that the new form of nanosilicon under the studied conditions for obtaining silicon films is represented by fibers with a diameter of 10 to 150 nm. From a microstructural point of view, a silicon film, when a significant proportion of a new type of nanosilicon is formed in the film composition, acquires a porous cellular structure resulting from the interweaving of silicon nanofibers. The cells have an elongated oval shape with a width and length of about 1 and 3 μm , respectively. The obtained microphotographs are compared with similar data obtained when creating thin silicon films, which contain various polymorphic modifications of silicon in order to further classify the visual display of polymorphism and non-ideality of silicon nanostructures.

Keywords: *fibrous nanosilicon, electron microscopy, non-ideality, non-monocrystallinity, magnetron sputtering, amorphous silicon, crystalline silicon, film.*

1. Introduction

Traditional monocrystalline manufacturing methods are showing their limits, as evidenced by the slowing rate of transistor size reduction and the limited efficiency of crystalline solar cells [1-3]. To further improve the characteristics of functional elements, it is necessary to look for new approaches to creating nanostructures [4-6]. Modern advances in micro- and nanoelectronics demonstrate that the use of non-monocrystalline materials can lead to a breakthrough in the development of unique devices [7-8]. The absence of single crystallinity and the presence of various defects in the atomic lattice expand the properties of materials, providing them with new functions, such as flexibility and uniformity over large areas. In addition, non-monocrystalline silicon, including amorphous, micro- and nanocrystalline, opens up ways to reduce the cost of semiconductor device production [6]. The use of nanostructured silicon is in demand from the point of view of creating wide-gap materials, for example, silicon carbide, and expanding the spectrum closer to the ultraviolet range. The use of amorphous silicon increases the band gap and broadens the absorption spectrum. In addition, the influence of the energy levels of defect centers and dopant impurities can significantly improve the spectral dependences, both in the visible and in the infrared (IR) range, which in total will significantly increase the absorption band of photovoltaic structures [3, 12-14].

One of the most important characteristics of semiconductor structures is their optical spectral dependencies. The study of these dependencies makes it possible to identify ways to increase the mobility of charge carriers in thin-film transistors, charge-coupled devices and the efficiency of photoconverting elements [3, 4, 6]. This largely explains the widespread use of spectral methods for analyzing thin film structures in production conditions to assess the quality of the finished product. Such methods include Raman spectroscopy, diffractometry, IR spectroscopy and others. However, spectral methods often do not always make it possible to consider all the features of the obtained material. For example, for the technological properties of thin films, the types of geometric forms of polymorphic modifications of silicon, the relative position, the degree of localization of various forms, etc. are often important. There are many ways to produce thin films. Depending on the chosen method and deposition conditions, a number of features of the structure of the film and its constituent elements may differ in the presence of similar results of spectral analysis. In this regard, there is a need for direct visual study of thin films using various types of electron and atomic force microscopy, accumulation and classification of the resulting varieties of micro and nanostructures that arise during the formation of thin films. In this article, we summarize the experience that has previously been accumulated with respect to the microscopic analysis of non-monocrystalline silicon structures, and also present a new, previously unknown form of a silicon thin film component that can be identified as a type of nanosilicon.

One of the options for a visual description of nanosilicon is the statement that this polymorphic structure has a spherical shape with a diameter of 3-10 nm [12]. The same data are provided from other sources regarding the size of silicon nanospheres - 3.5-20 nm [13]. However, the authors did not provide the corresponding microphotographs. This statement is partially supported by the microphotograph shown in Figure 1, obtained by transmission microscopy, as well as the microphotograph shown in Figure 2, obtained by atomic force microscopy.

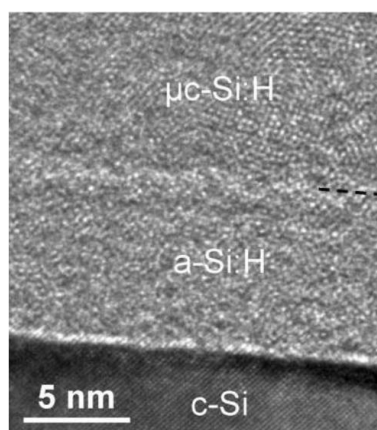


Figure 1. Micrograph of the atomic structure of single-crystalline, microcrystalline and amorphous silicon obtained using high-resolution transmission electron microscopy

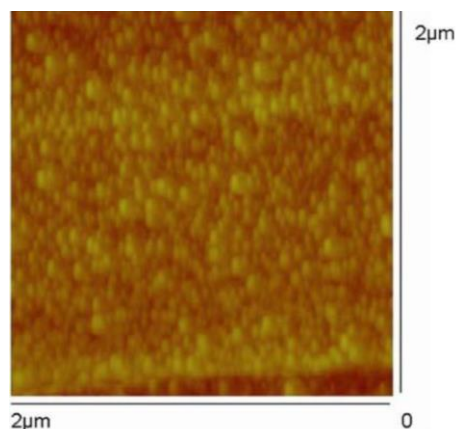


Figure 2. Micrograph of nanosilicon obtained using atomic force microscopy [15]

The film shown in Figure 1 was obtained by thermocatalytic chemical deposition (hot-wire chemical vapor deposition - HWCVD) when using a mixture of silane and hydrogen as precursors [14]. However, this image is difficult to accept as an image of nanoparticles. Judging by the scale here, we see some features of the atomic lattices of silicon, and not individual nanoparticles that have their own interface, limiting the collection of a certain set of silicon atoms. Even if we accept that we are observing nanoparticles, it should be noted that their sizes, judging from the image scale (about 0.1-0.3 nm), are much smaller than the sizes mentioned by the authors mentioned above [12, 13].

The film shown in Figure 2 was also obtained by the HWCVD method. The authors emphasize that this result was obtained as a result of strong dilution of silane with hydrogen (up to 95-98%). In this figure we also see spherical particles, but their size is much larger (about 100 nm) than the authors say [12, 13] and much larger than the authors say [14].

Another type of thin silicon film is amorphous films obtained in argon hydrogen plasma by magnetron sputtering. Films of amorphous and amorphous hydrogenated silicon (a-Si and a-Si:H) were obtained on magnetron installations of the type URM 3.279.014 and URM 3.279.026 (USSR) at a pressure in the working chamber of 10^{-2} - 10^{-3} Pa, voltage and target current – 500-650 V and 1.5-2 A, respectively [16]. The deposition rate was 0.1-0.4 $\mu\text{m}/\text{min}$, and the gas discharge current was 40 mA. The gas mixture in the magnetron chamber included argon and hydrogen. Films of amorphous and amorphous hydrogenated silicon were formed at different relative concentrations of hydrogen (0-60%), which were defined as the ratio of the partial pressure of hydrogen to the pressure of a mixture of argon and hydrogen. As substrates for the films under study, dielectrics (glass-ceramic substrates based on glass ceramics), semiconductors (p- and n-type crystalline silicon wafers, in order to create phase heterostructures - amorphous-crystalline material and conductors (based on brass, titanium, silver, beryllium bronze, aluminum foil) were used. Micrographs of this type of film are presented in Figure 3 [16].

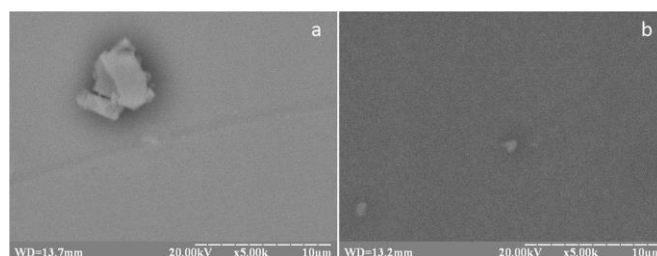


Figure 3. Defects on a-Si:H films: at a hydrogen content in plasma of 30% (a) and 50% (b) [16]

It is very difficult to compare previously discussed nanostructures (Figure 1-2) and amorphous structure (Figure 3). On the one hand, we can say that the amorphous structure is homogeneous and does not contain any signs of isolated micro or nano-sized particles with their own interface, with the exception of individual particles with characteristic signs of a crystalline nature 1-3 microns in size. However, it is quite possible that if we enlarge the images in Figure 3 to the level of Figure 2, we will see the same spherical particles with sizes of about 100 nm, which are not visible at the current magnification. In this regard, it is difficult to consider the visual difference between the nanocrystalline phase and the amorphous silicon phase as proven.

There are also microscopic studies of various polymorphic structures of a non-filmic nature. Powders not attached to a substrate are easier to study, because there is no problem with the ability to observe the features of the structures located inside the film. Nanocrystalline silicon powder was obtained by high-temperature plasma-chemical synthesis. Water was used as a coolant and argon as a buffer gas. The starting material was silicon, crushed into microcrystalline powder with particle sizes of tens of micrometers [17, 18].

Figure 4 shows micrographs of the surface structure of powder nanosilicon (pwSi) obtained in this way. These photographs allow you to evaluate the shape and size of microparticles of the powder material. As can be seen from the figure, the powder is characterized by microcrystals and tubular structures [1, 7, 18].

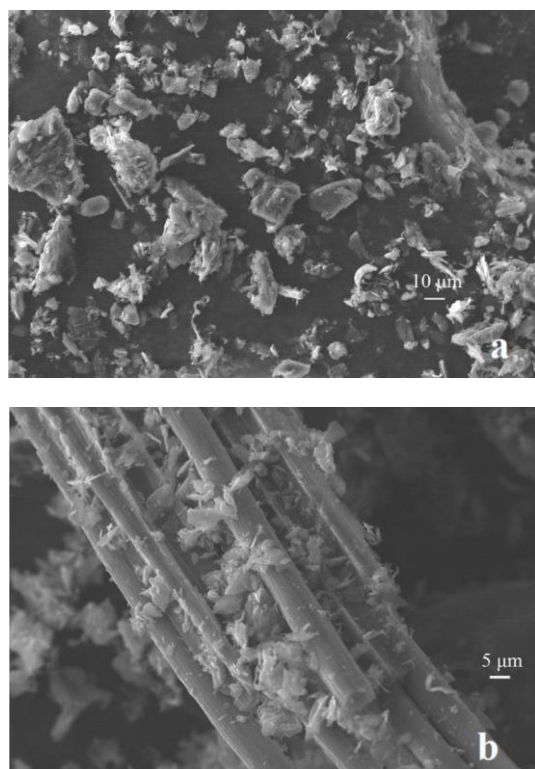


Figure 4. Microparticles (a) and microtubes (b) of powdered silicon at magnification using an electron microscope [17, 18, 19]

Figure 4 shows that powdered silicon has individual microparticles, and their complex branched surface relief is visible. Both individual microtubes and their clusters are present. Microparticles are also observed near the surface of tubular structures. However, Figure 4 does not allow nanocrystallites to be seen. In this regard, high-magnification electron microscopy was also used, as shown in Figure 5 [19]. The spherical particles shown in Figures 1 and 2 are also not visible in Figure 5. The authors note that the powder consists of silicon microparticles with a large number of nanocrystallites on their surface. Figure 5 (c) shows that the silicon microparticle has a porous, loose spongy structure; however, it is quite difficult to talk about the presence of nanocrystallites at this magnification. And only after an even greater magnification of the image of the same particle, the presence of nanocrystallites becomes obvious. With the magnification shown in Figure 6, we can confidently say that the material is represented by spherical nanocrystallites with a diameter of about 100-150 nm, i.e. the result of microscopy of silicon powder coincided with the result of microscopy of silicon film, presented here in Figure 2. According to the authors, the electron diffraction pattern presented in Figure 6 (b) is a set of concentric circles (rings), which proves the micro-nanocrystalline structure of the substance.

In general, it should be noted that despite the key importance of silicon films in modern science and production in the fields of electronics, photovoltaics, electrical energy storage, etc., information about the features of the micro and nanostructure of these films is very contradictory. Theoretical studies on this issue often do not agree with practical data obtained by various microscopy methods. Meanwhile, the lack of classified data on this matter greatly complicates the targeted optimization of the technical properties of silicon films. This article is devoted to this problem.

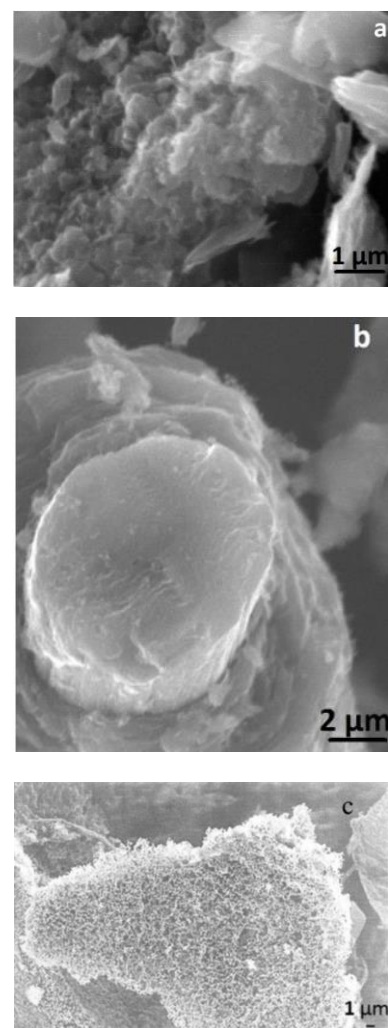


Figure 5. The surfaces of particles shown in Figure 4 at a higher magnification: microparticles (a), microtubes (b), microparticles with nanocrystallites on the surface (c) [19]

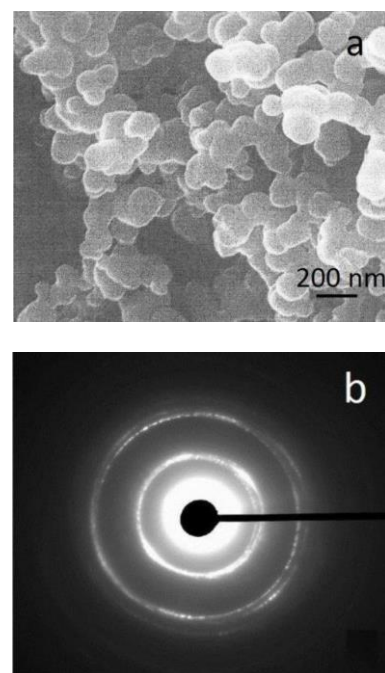


Figure 6. Nanocrystallites on the surface of powdered silicon particles, shown in Figure 5 (c) at high magnification (a) and its electron diffraction pattern (b) [19]

2. Materials and methods

For microscopic examination, several types of silicon nanofilms were synthesized under various technological conditions of magnetron sputtering using the Caroline D12C system. Silicon crystals grown by the Czochralski method using commercial high-purity silicon of SoG-Si grade 6-7N were used as targets for magnetron sputtering. The substrate was copper foil 0.5 mm thick. The thickness of the silicon film was 300-400 nm.

Microstructural analysis was carried out using three types of equipment. By comparing the obtained parallel micrographs, we selected those that most qualitatively demonstrated the features of the micro and nanostructure of silicon films. Microscopy equipment used:

1. Electronic transmission microscope JEM 2100. Magnification of the microscope from 50 to 1 500 000 times allows you to fully study the atomic crystal structure of the material, including the morphology and characteristics of the crystal structure, characteristics of the type and distribution of various defects in the crystal structure (grain boundaries, stacking faults, dislocations, various combinations of point defects), as well as carry out a chemical analysis of particles and various inclusions released in alloys (including gas bubbles, voids), and study the domain structure;

2. Scanning electron microscope JEOL JSM-6490LA, used to determine chemical elements, microanalysis to determine the elemental composition of the sample, as well as to determine the thickness of the resulting silicon films;

3. Atomic force microscope (AFM) Ntegra Thermo. AFM is a modern method for studying surfaces and surface properties.

The polymorphism of silicon films was clarified using Raman spectroscopy. Raman spectroscopic analysis was carried out on a Horiba brand system Jobin-Yvon HR800UV (France). An argon-cadmium laser with a wavelength of 315 nm was used as the excitation source. The laser power on the sample was ~25 mW for Ar / Cd. The holographic diffraction grating had 2200 lines/mm for a 315 nm laser and was focused onto a CCD detector. The lens was Olympus 412 UV for Ar/Cd. The measurements were carried out in the range from 0 to 3200 cm^{-1} . No filter was used to reduce the radiation entering the detector from the samples.

3. Results and discussion

All thin silicon films that were obtained during the study under various conditions of magnetron sputtering can be divided into two main types. For each sample, several parallel microscopic observations were carried out at several different points along the entire surface of the film. This test showed the uniformity of the morphology of the entire surface of each type of film, which indicates the advantage of magnetron sputtering technology over the CVD method in terms of ensuring film uniformity. According to the available literature data, films produced by CVD are extremely heterogeneous in terms of polymorphism [12]. Figure 7 shows micrographs of the first type of silicon film.

A preliminary examination of the microphotographs shows that the structure of the first type of silicon film is visually represented by crystalline and amorphous silicon in approximately comparable proportions with a predominance of the amorphous component.

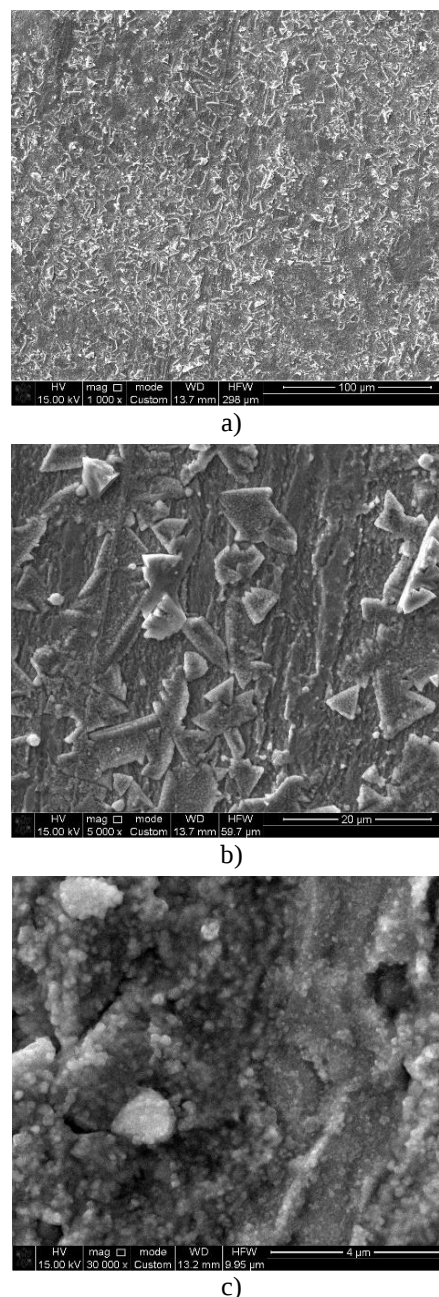


Figure 7. Micrograph of the surface of a silicon film of the first type (a combination of amorphous and crystalline silicon) at magnification: (a) $\times 1000$; (b) $\times 5000$; (c) $\times 30000$

Figure 8 shows photographs of the second type of silicon film at different magnifications. Comparison of photographs in Figures 7 and 8 shows a fundamental change in the structure of the silicon film. Visually, one can see the appearance of a nanosilicon structure that has not previously been found in the literature. Unlike the spherical particles that we observed previously, the new nanosilicon structure has the form of intertwined fibers with a diameter of 10 to 150 nm. One could assume that this form has common features with the already known form of microtubes, presented in Figure 4. However, unlike new silicon nanofibers, microtubes have a rigid shape, which does not provide the possibility of interlacing, and their diameter is much larger - from 5 to 10 μm . From a microstructural point of view, the new type of silicon film acquires a porous cellular structure resulting from the interweaving of silicon nanofibers. The cells have an elongated oval shape with a width and length of about 1 and 3 μm , respectively.

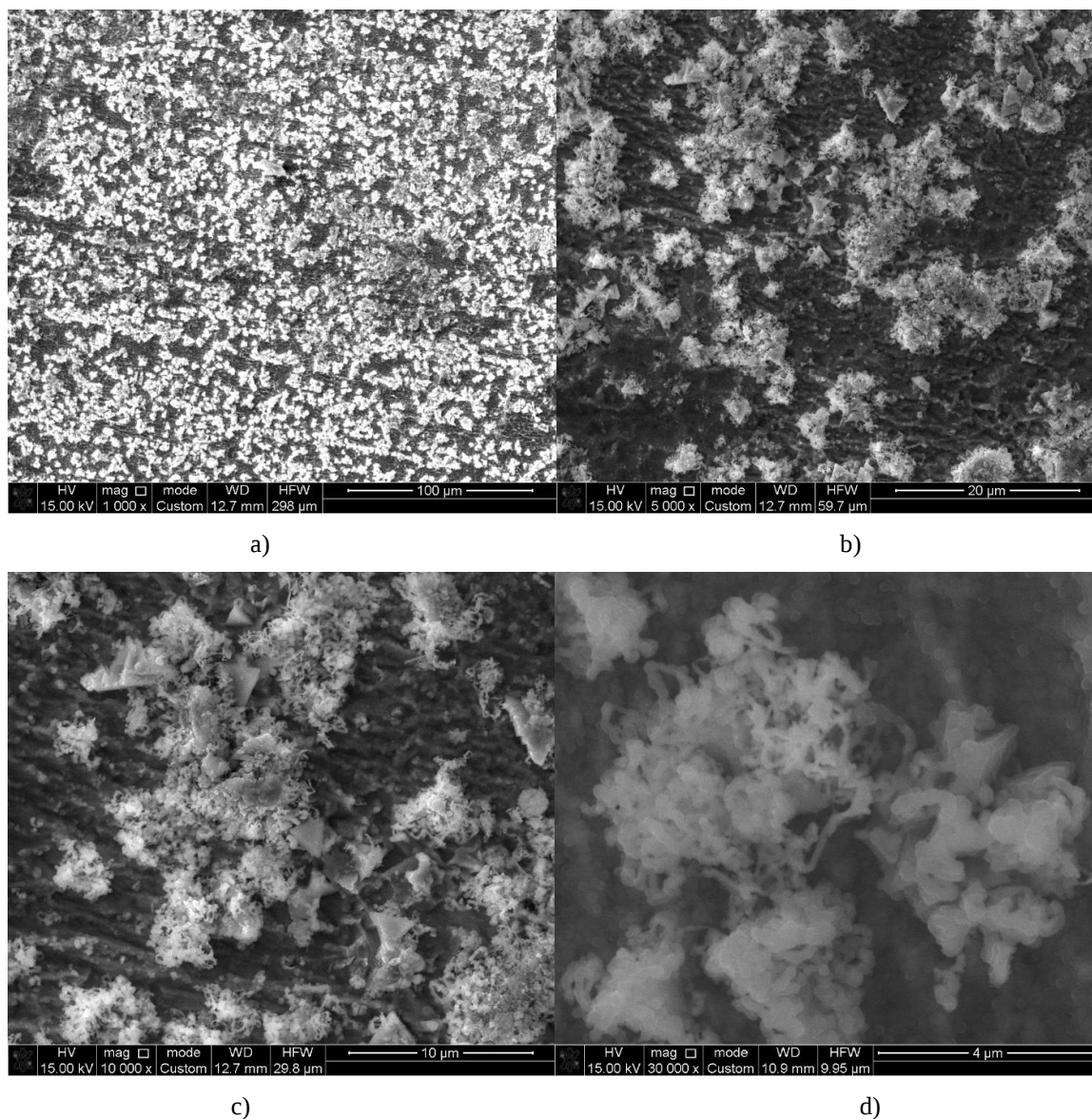


Figure 8. Micrograph of the surface of a second type of silicon film (a new type of fibrous nanosilicon) at magnification: (a) $\times 1000$; (b) $\times 5000$; (c) $\times 10000$; (d) $\times 30000$

Comparing the conditions under which silicon films were obtained, it can be tentatively assumed that the emergence of a new type of silicon nanofilm is associated with an increase in pressure during magnetron sputtering, which leads to the appearance of a nanosilicon phase against the background of a reduction in the amorphous and, to a greater extent, crystalline phases. However, with a simultaneous increase in the specific power at the target and the pressure in the working chamber, the proportions of the amorphous and nanocrystalline phases of silicon decrease due to an increase in the proportion of the crystalline phase.

In addition, a significant increase in the fraction of nanosilicon from 45.6 to 64.0% may be associated with an increase in the voltage pulse frequency applied to the target. Arbitrary variation of the magnetron sputtering parameters indicated above leads to ambiguous changes in the ratio of polymorphic forms of silicon in the film. From this, we can conclude that there are some optimal values of these parameters and they can be detected basing on mathematical modeling of multifactorial dependence. This requires additional experiments, which will be carried out in the future.

4. Conclusions

In the process of microscopic examination of magnetron sputtering products - silicon films, a previously unknown polymorphic modification - fibrous nanosilicon was identified, and the result of obtaining crystalline silicon was reproduced. The new silicon film obtained under experimental conditions acquires a porous cellular structure resulting from the interweaving of silicon nanofibers with a diameter of 10 to 150 nm. The cells have an elongated oval shape with a width and length of about 1 and 3 μm , respectively. This form is fundamentally different from the previously described form of nanosilicon as spherical particles with a diameter of about 100 nm. It has been established that the greatest influence on increasing the proportion of new nanosilicon in the film composition is exerted by an increase in the pressure in the working chamber and the frequency of voltage pulses on the target.

An increase in the specific power at the target leads to a reduction in the proportion of the amorphous phase and an increase in the crystalline phase, but this indicator does not

affect the increase in the proportion of nanocrystalline silicon. Increasing the pressure in the working chamber and the voltage frequency helps to increase the proportion of nanosilicon. However, there is probably a limit to these parameters, beyond which a further increase in their values reduces the share of nanosilicon.

Additional experiments are needed to identify more accurate optimal values of magnetron sputtering parameters and to test the resulting silicon films as anodes of lithium-ion batteries. Parallel microscopic measurements showed the uniformity of the polymorphic composition of both types of films, which confirms the advantages of magnetron sputtering technology over the CVD method.

References

- [1] Dai, X. (2017). Improving convergence and simulation time of quantum hydrodynamic simulation: Application to extraction of best 10-nm FinFET parameter values. *IEEE Transactions on Very Large Scale Integration (VLSI) Systems*, 25(1), 319-329. <https://doi.org/10.1109/TVLSI.2016.2564300>
- [2] Goli, M.H., González-Vélez, H. (2017). Autonomic coordination of skeleton-based applications over CPU/GPU multi-core architectures. *International Journal of Parallel Programming*, 45 (2), 203–224. <https://doi.org/10.1007/s10766-016-0419-4>
- [3] Green, M.A., Hishikawa, Y., Warta, W. (2017) Solar cell efficiency tables (version 50). *Progress in Photovoltaics*, 25(7), 668–676. <https://doi.org/10.1002/pip.2909>
- [4] Chebotarev, S.N., Kalinchuk, V.V. & Lunin, L.S. (2016). Semiconductor nanoheterostructures with an intermediate subband. *M.: Physics and Mathematics Literature*
- [5] Chen, Y., Zhang, H. & Zhu Y. (2002). A new method of fullerene production: pyrolysis of acetylene in high-frequency thermal plasma. *Materials Science and Engineering*, 95 (1), 29–32. [https://doi.org/10.1016/S0921-5107\(02\)00130-7](https://doi.org/10.1016/S0921-5107(02)00130-7)
- [6] Afanasyev, V.P., Terukov, E.I. & Sherchenkov, A.A. (2011). Thin-film solar cells based on silicon. *St. Petersburg: Publishing house of St. Petersburg Electrotechnical University «LETI»*
- [7] Sattler, K.D. (2016). Carbon Nanomaterials Sourcebook: Graphene, Fullerenes, Nanotubes, and Nanodiamonds (Volume 1). *CRC Press*
- [8] Fabry, F., Gruenberger, T.M. & Aguilar, J.G. (2005). Continuous mass production of fullerenes and fullerene nanoparticles by 3-phase AC plasma processing. *NSTI Nanotech Technical Proceedings*, 3, 201–204
- [9] Behera, S.N., Gayen, S., Ravi Prasad G.V. & Bose, S. (2007). Electronic properties of ordered and disordered linear clusters of atoms and molecules. *Physica*, 390, 124–133. <https://doi.org/10.1016/j.physb.2006.08.018>
- [10] Zhigunov, D.M., Ilyin, A.S. & Forsh, P.A. (2017). Luminescence of solar cells with a - Si : H / c - Si heterojunction. *Letters to the Journal of Theoretical Physics*, 43(10), 95–101. <https://doi.org/10.1134/S1063785017050261>
- [11] Thevaril, J., O'Leary, S.K. (2010). Defect absorption and optical transitions in hydrogenated amorphous silicon. *Solid State Commun*, (150), 1851–1855. <https://doi.org/10.1016/j.ssc.2010.06.034>
- [12] Gaisler, S.V., Semenova, O.I., Sharafutdinov, R.G. & Kolesov, B.A. (2004). Analysis of Raman spectra of amorphous- nanocrystalline silicon films. *Solid State Physics*, 46(8), 1484-1488. <https://doi.org/10.1134/1.1788789>
- [13] Kamei, T., Stradins, P. & Matsuda, A. (1999). Effects of embedded crystallites in amorphous silicon on light-induced defect creation. *Applied Physics Letters*, 74(12), 1707-1709. <https://doi.org/10.1063/1.123662>
- [14] Olibet, S., Vallat-Sauvain, E. & Fesquet, L. (2010). Properties of interfaces in amorphous/crystalline silicon heterojunctions. *Phys. Status Solidi A*, 207(3), 651–656. <https://doi.org/10.1002/pssa.200982845>
- [15] Esmaili Rad, M.R., Sazonov, A. & Kazanskii, A.G. (2007). Optical properties of nanocrystalline silicon deposited by PECVD. *Journal of Materials Science: Materials in Electronics*, 18, P. 405–409. <https://doi.org/10.1007/s10854-007-9230-8>
- [16] Mazinov, A., Shevchenko, A. & Bahov, V. (2014). Quantum interactions of optical radiation with the defect centers in the tails of the forbidden band of amorphous materials. *Optica Applicata*, 44(2), 327–335. <https://doi.org/10.5277/oa140213>
- [17] Mazinov, A.S., Shevchenko, A.I. & Voskresensky, V.M. (2014). Nanostructured semiconductors obtained by powder method. *Scientific notes of the Tauride National University named after V.I. Vernadsky, Series Physical and Mathematical Sciences*, 27 (66), 107–114
- [18] Mazinov, A.S., Shevchenko, A.I., Voskresensky, V.M. & Kuropatkin A.V. (2014). Nanostructured semiconductors based on powder technology. *24th International Crimean Conference «Microwave Engineering and Telecommunication Technologies (CriMiKo'2014)», Sevastopol*
- [19] Mazinov, A.S., Shevchenko, A.I., Voskresensky V.M. (2015). Silicon-carbon structures for modern micro- and nanoelectronics. *25th International Crimean Conference «Microwave Engineering and Telecommunication Technologies (CriMiKo'2015)», Sevastopol*

Талшықты нано кремний бар магнетронды шашыратылған монокристалды емес кремнийлі жұқа қабықшалардың электронды микроскопиясы

Қ. Толубаев¹, Б. Жаутиков¹, Н. Зобнин^{1*}, Г. Даирбекова², С. Кабиева¹, Риад-Таха Ал-Касахбех³

¹Қарағанды индустриялық университеті, Теміртау, Қазақстан

²Satbayev University, Алматы, Қазақстан

³Иордания университеті, Амман, Иордания

*Корреспонденция үшін автор: zobninnn@mail.ru

Андатпа. Мақалада магнетронды бүрку арқылы алынған нано кремнийдің бұрын зерттелмеген түріне негізделген кремний пленкасының жаңа түрінің микроқұрылымының ерекшеліктері қарастырылады. Микроқұрылымдық талдау JEOL JSM-6490LA растрлық электронды микроскопында, JEM2100 электронды трансмиссиялық микроскопында және Ntegra Thermo атомдық күштік микроскопында (AFM) жүргізілді. Кремний пленкаларының Раман спектроскопиялық талдауы Horiba system Jobin – Yvon HR800UV (Франция) маркалы жүйесінде жүргізілді. Кремний пленкаларын алудың зерттелген жағдайында нано кремнийдің жаңа түрі диаметрі 10-нан 150 нм-ге дейінгі талшықтармен

ұсынылатыны анықталды. Микроқұрылымдық тұрғыдан алғанда, кремний пленкасы нано кремний талшықтарының бір-бірімен араласуы нәтижесінде пайда болатын кеуекті жасушалық құрылымға ие болады. Жасушалардың ені мен ұзындығы сәйкесінше 1 және 3 мкм болатын ұзартылған сопақша пішіні бар. Алынған микрографтар полиморфизмнің визуалды картасын әрі қарай жіктеу және кремнийдің нано құрылымдарының идеалдығын емес, құрамында кремнийдің әртүрлі полиморфты модификациялары бар жұқа кремний пленкаларын жасау кезінде алынған ұқсас деректермен салыстырылады. Зерттеу барысында алынған кеуекті құрылымы бар нано өлшемді кремний анодтары LIB зарядтау процесінде литизацияға тезірек ұшырайды және цикл арқылы аз ыдырайтыны анықталды.

Негізгі сөздер: талшықты наносиликон, электронды микроскопия, идеалдылық емес, монокристалдылық емес, магнетрондық шашырау, аморфты кремний, кристалды кремний, қабықша.

Электронная микроскопия не монокристаллических тонких кремниевых плёнок магнетронного напыления, содержащих волокнистый нанокремний

К. Толубаев¹, Б. Жаутиков¹, Н. Зобнин^{1*}, Г. Даирбекова², С. Кабиева¹, Риад-Таха Ал-Касахбех³

¹Карагандинский индустриальный университет, Алматы, Казахстан

²Satbayev University, Алматы, Казахстан

³Университет Иордании, Амман, Иордания

*Автор для корреспонденции: zobninnn@mail.ru

Аннотация. В статье рассмотрены особенности микроструктуры нового типа кремниевой плёнки, на базе ранее не изученной формы нано кремния, полученных методом магнетронного напыления. Микроструктурный анализ проводили на растровом электронном микроскопе Jeol JSM-6490LA, электронном просвечивающем микроскопе JEM2100 и атомно-силовом микроскопе (АСМ) Ntegra Thermo. Рамановский спектроскопический анализ кремниевых плёнок проводился на системе марки Horiba Jobin–Yvon HR800UV (Франция). Установлено, что новая форма нано кремния в изученных условиях получения кремниевых плёнок представлена волокнами диаметром от 10 до 150 нм. С микроструктурной точки зрения плёнка кремния при формировании значительной доли нано кремния нового типа в составе плёнки приобретает пористую ячеистую структуру, возникающую в результате переплетения нано волокон кремния. Ячейки имеют вытянутую овальную форму шириной и длиной около 1 и 3 мкм соответственно. Полученные микрофотографии сопоставлены с аналогичными данными, полученными при создании тонких кремниевых плёнок, которые имеют в своём составе различные полиморфные модификации кремния с целью дальнейшей классификации визуального отображения полиморфизма и не идеальности нано структур кремния. Предположительно, выявленные в ходе исследования нано размерные кремниевые аноды с пористой структурой будут быстрее подвергаться литированию в процессе зарядки LIB и меньше будут разрушаться в результате циклирования.

Ключевые слова: волокнистый нано кремний, электронная микроскопия, не идеальность, не монокристаллическость, магнетронное напыление, аморфный кремний, кристаллический кремний, плёнка.

Received: 05 July 2024

Accepted: 15 October 2024

Available online: 31 October 2024

<https://doi.org/10.51301/ejsu.2024.i5.04>

Industrial application of bacterial iron oxidation in in-situ leaching technologies for uranium

E. Bektay, G. Turysbekova, B. Shiderin*, M. Bektayev

Satbayev University, Almaty, Kazakhstan

*Corresponding author: shbaur@mail.ru

Abstract. A technology for bacterial iron oxidation in the process of in-situ leaching of uranium has been developed and proposed for industrial use. The technology was validated by the results of pilot tests conducted at a uranium deposit in Kazakhstan over a period of 12 months. The aim of the study was to develop a technology for bacterial iron oxidation in the process of in-situ uranium leaching using a new type of flow bioreactor. Two biotechnological installations with bioreactors of 20 m³ volume were created and installed in 40-foot containers. The bioreactors, equipped with piping, air compressors, a pumping station, and control and measuring instruments, were installed at the geotechnical site and connected to the main in-situ uranium leaching system through wells. The installations had a productivity of over 150,000 m³/year for the leaching solution. After passing through the bioreactors, the redox potential of the solution increased from 360 mV to 430-450 mV in flow mode. The concentration of ferric iron increased from 0.1 g/L to 1.5 g/L and higher. The bacterial iron oxidation process was carried out at a solution temperature of 10 to 12°C (optimal temperature — 25-35°C), which allowed eliminating the costs of heating the solution. The test results showed an increase in uranium content in the productive solution by 10-20% after the leaching solution passed through the ore-bearing layer for 1 month. This confirmed the prospects for using this technology for in-situ well uranium leaching. The economic costs of using the technology are 6-8 times lower compared to using chemical oxidants such as hydrogen peroxide. The obtained industrial results open new prospects for the application of biotechnological methods for in-situ well leaching of uranium and other metals for the first time.

Keywords: uranium, in-situ leaching, in-situ, bioleaching, ferrous iron, ferric iron, nanoparticles, iron-oxidizing bacteria.

1. Введение

Использование технологии подземного скважинного *insitu* выщелачивания урана (ИСЛ) значительно развилось в мире за последние десятилетия. Успех Казахстана в добыче урана базируется на этой технологии (более 20 тысяч тонн урана в год). Снижение цены на уран требует внедрения технологий, направленных на уменьшение стоимости добычи и переработки урана, а также интенсификацию процессов.

Одним из подходов является применение бактериального выщелачивания с использованием бактерий, окисляющих железо, таких как *A. ferrooxidans*, которое по основным технологическим показателям соответствует режимам, применяемым для подземного скважинного *insitu* выщелачивания урана. Были предприняты неоднократные попытки использования биовыщелачивания для урана, однако эти методы не получили широкого распространения. Однократные подачи бактериального раствора не давали нужного результата, особенно учитывая, что в процессе подземного скважинного *insitu* выщелачивания урана раствор проходит через рудоносный слой в течение 20-30 дней. Условия для жизнедеятельности бактерий в рудоносном слое не позволяли им размножаться и проявлять свою активность.

Применение биогеотехнологий в горнодобывающей практике значительно отличается от использования био-

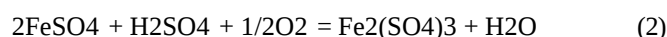
технологий в производстве лекарственных препаратов или пищевых продуктов. Это связано с существенной неоднородностью состава руды и наличием технологических факторов, которые оказывают значительное влияние на процесс. Необходимо учитывать сложную природу рудного тела, а также то, что материал меняется не только в разных блоках, но и внутри одного и того же блока.

1.1. Химия процесса воздействия бактериального окисления железа

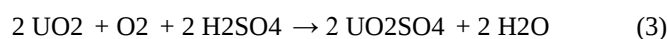
Химия процесса воздействия описана достаточно подробно в литературе. Трехвалентное железо, образующееся в результате окисления двухвалентного железа бактериями, выступает в роли окислителя для тетравалентного урана:



Образующееся в ходе окисления урана двухвалентное железо затем повторно окисляется тионными бактериями (например, *A. ferrooxidans*):



Также возможно прямое окисление урана бактериями (прямой механизм):



Бактерии, способные окислять железо (II), были впервые обнаружены в кислых водах угольных шахт США, а затем – в кислых водах медного карьера Биндхем (США) [1, 2]. Позднее подобные бактерии были найдены на руднике Рио Тинто в Испании, где медь выщелачивается уже около 300 лет. На территории России такие бактерии встречаются, например, в кислых шахтных водах сульфидных месторождений Урала, Алтая и Кольского полуострова [3].

Во время микробиологического выщелачивания бактерии окисляют сульфидные минералы, что приводит к образованию ионов трехвалентного железа и серной кислоты в водной фазе – набора реагентов, благодаря окислительно-восстановительным реакциям, которые окисляют U(IV) и образуют растворимый U(VI). Эта трансформация, обусловленная химической активностью микроорганизмов, лежит в основе биометаллургического процесса, который экономически оправдан для бедных и небалансовых руд и хвостов уранового производства (т.е. в тех случаях, когда стандартный процесс не применим) [1-3].

Первые исследования, которые подтвердили возможность коммерциализации бактериального выщелачивания урана из бедного сырья, были проведены в начале 1950-х годов. В 1952-1953 годах в Уржейрика (Португалия) началось промышленное использование версии этого процесса в виде кучного выщелачивания с применением железобактерий *A. ferrooxidans* [4, 5]. Позже процесс был реализован на руднике Эллиот-Лейк (Канада) с использованием раствора серной кислоты и сульфата железа (III) в качестве бактериальной среды [6, 7].

В ходе эксплуатации этих предприятий было установлено, что одним из основных факторов, определяющих эффективность бактериального выщелачивания урана, является содержание пирита в руде. Разложение этого минерала не только способствует поступлению окислителя и комплексообразующего агента в зону реакции, но и генерирует тепло. Поэтому руды из месторождений Восточной Канады, где пирит связан с ураном, удобны для переработки. Если пирита в руде недостаточно, его можно добавить [8].

Еще одним важным фактором является характер минерализации урана, так как его оксиды, фосфаты, сульфаты и карбонаты легко растворяются, в то время как силикатные формы сложно или вовсе не поддаются выщелачиванию [9]. Показатели биовыщелачивания также зависят от генезиса месторождения, который определяет тип и минералогические характеристики породообразующих минералов. Если эти породы имеют щелочной состав, это может привести к осаждению веществ, что снижает фильтрационную способность рудного слоя, через который просачивается раствор, и способствует образованию изолированных участков. В то же время наличие кислых пород снижает расход кислоты, которая в меньшей степени взаимодействует с минеральными примесями [9, 10].

Еще одним важным фактором является количество питательных веществ (добавляемых искусственно или извлекаемых из минералов), достаточное для роста бактериальной культуры. В частности, распространенным технологическим методом является добавление азота в процесс биоокисления в виде сульфата аммония в реак-

торы [11]. *A. ferrooxidans* устойчива к ионам металлов, таким как хром, медь, цинк, никель, торий, уран и ртуть. В то же время наличие некоторых металлов и органических соединений в окружающей среде (например, экстракты грибов) может блокировать процесс окисления пирита этим типом бактерий [4, 9].

Температура является параметром, определяющим разнообразие микробиологических популяций [12]. Наиболее подходящими для исследований и промышленного применения оказались умеренно термофильные бактерии, окисляющие железо и серу, изначально выделенные из шахтных вод и горячих источников, работающие при температуре 30-40 °C [13-15]. В этой температурной зоне наиболее важными микроорганизмами, подходящими для *insitu* выщелачивания урана из хвостохранилищ, являются грамотрицательные бактерии: сероокисляющие *Acidithiobacillus ferrooxidans*, *Acidithiobacillus thiooxidans*, *Acidithiobacillus caldus* и железобактерии *Leptospirillum ferrooxidans* и *Leptospirillum ferriphilum* [11].

Для популяции *A. ferrooxidans* оптимальные значения pH находятся в диапазоне 1,5-3, однако при значительном содержании пирита в руде это значение может снижаться до 1 или даже ниже [9]. Менее ацидофильные бактерии группы *Thiobacillus*, такие как *Thermithiobacillus tepidarius*, *T. aquaesulis*, *T. denitrificans*, *T. thioparus*, могут за 10 дней снизить pH до значений 1,4-1,6 [16]. Отвалы горнодобывающих предприятий с низким содержанием серы и высоким содержанием хлоридов, имеющие исходное значение pH 9, представляют собой среду для функционирования популяции бактерий *A. ferrooxidans* [17]; те же бактерии активны в дренажных растворах при pH = 7,2 [18].

Во всех процессах выщелачивания с участием ацидофильных бактерий важным параметром является степень насыщения раствора или пульпы кислородом. В условиях принудительного перемешивания падение концентрации кислорода ниже 0,5-1,0 мг/дм³ вызывает остановку процесса. Было показано, что использование принудительной аэрации (расход воздуха 8 т/т твердого вещества, коэффициент использования кислорода 25 %) значительно сокращает время выщелачивания при кучном бактериальном выщелачивании руд на нескольких месторождениях Австралии [19].

При этом популяция аэробных бактерий *A. ferrooxidans* способна расти на поверхности восстановленных неорганических серосодержащих минералов без кислорода, используя трехвалентное железо в качестве акцептора электронов [20]. Недостаток углекислого газа оказывает влияние на рост автотрофных бактерий и может резко снизить скорость и полноту их взаимодействия с сульфидными минералами [21].

Комплексное исследование руд месторождений Канады и Испании, где уран является частью кофинита, уранинита и других минералов, позволило установить, что на расход кислоты (меньший, чем при стандартном выщелачивании) влияет не только исходное содержание пирита, но и его соотношение с халькопиритом [6, 22]. Ряд исследований также установил оптимальные параметры процесса (pH, температура и время перемешивания) [3].

Важным моментом стало обнаружение колоний аэробных и анаэробных бактерий в отвалах двух немец-

ких заводов, содержащих 0,05 % урана и от 0,5 до 7 % карбонатов [23]. Результаты исследования этих отвалов показали, что на глубине 1,5–2,0 м более 99 % всех культур были представлены бактериями *Thiobacillus ferrooxidans* (*A. ferrooxidans*) [23]. Также было обнаружено присутствие бактерий, восстанавливающих серу, в урансодержащих шахтных водах на ряде бразильских предприятий [24].

На предприятии в Канаде Rio Algom был протестирован процесс периодического орошения стен очистных забоев кислотными шахтными водами; в результате в 1964-1965 годах было дополнительно извлечено около 57 тонн урана. В настоящее время на Rio Algom используется технология кучного бактериального выщелачивания урана.

С 1969 года на фабрике Agnew Lake в Канаде проводятся испытания бактериального выщелачивания урана из рудной массы в очистных забоях. Через восемь месяцев контакта с 50 тоннами руды извлечение урана в раствор составило 57 %. В настоящее время этот процесс используется в промышленном масштабе.

С 1984 года на фабрике Denison в Канаде были протестированы три варианта подземного выщелачивания урана с использованием бактерий *A. ferrooxidans*: использование шести колонн диаметром 0,6 м и высотой 3 м (с общим объемом загруженной руды 9 тонн), орошение очистных забоев и их полное затопление (после взрывного оголения руды) [25]. В последнем варианте раствор насыщался кислородом, и при необходимости добавлялся питательный элемент (15-20 мг/дм³ фосфорной кислоты). На фабрике Denison некоторые рудные тела содержат местные участки (диабазовые дайки), которые подверглись хлоритизации, что затрудняло обработку 4 миллионов тонн руды с использованием стандартного гидрометаллургического процесса. Испытания колонного варианта подземного бактериального выщелачивания хлоритизированной руды показали возможность извлечения до 70 % урана. Присутствие апатита в этой руде удовлетворяло потребность бактерий в питательных веществах. В течение 1988 года с помощью подземного выщелачивания на этом заводе было извлечено около 300 тонн урана (степень извлечения составила 69-86 %) при затратах свыше 25 миллионов долларов [10, 25]. С 1988 года, когда 90 очистных забоев находились на разных стадиях готовности, этот процесс был запущен в коммерческую эксплуатацию.

Другие примеры промышленного использования биовыщелачивания урана включают заводы, использующие кучный метод (Фигейра в Бразилии, Рейнджер в Австралии, Степногорский завод в Казахстане и Сен-Пьер во Франции) и скважинный метод (Олимпик-Дам и Беверли в Австралии) [8, 9, 26, 27]. Однако информация о данных проектах представлена в сжатом виде, и в настоящее время технология, по-видимому, не используется. Существуют данные, что биовыщелачивание используется в Китае для извлечения урана из хвостохранилищ [28-30].

Из данного анализа следует, что применение бактериального окисления железа и биотехнологических методов для подземного *insitu* выщелачивания урана ограничено, и отсутствуют примеры эффективной организации этого процесса.

1.2. Урановое месторождение

Семизбайское месторождение в Казахстане имеет сложную геологическую структуру с глубиной около 100 м. Эксплуатация рудника характеризуется высоким расходом серной кислоты из-за сложного вещественного состава руды. Процесс выщелачивания на месторождении Семизбай отличается относительно высоким содержанием двухвалентного железа в растворах выщелачивания (до 3 г/л), а накопление солей в растворе достигает 20-30 г/л.

Проблема повышения затрат на производство при относительно высоком содержании железа требовала инновационных подходов для снижения производственных расходов. Химический окислитель (перекись водорода) успешно используется, однако его применение ограничено высокой стоимостью химикатов. Альтернативой является бактериальное окисление железа, при котором конечным окислителем является кислород воздуха, а бактерии выступают в качестве катализатора процесса. Было проведено значительное количество лабораторных исследований, взяты пробы из насосных и инъекционных скважин. Наше специальное исследование показало, что бактерии, окисляющие железо, присутствуют повсеместно.

Лабораторные исследования подтвердили применимость бактериального окисления железа для усиления окислительно-восстановительного процесса раствора и превращения двухвалентного железа в трехвалентное в существующих системах выщелачивания рудника. Однако оставался открытым вопрос о том, как бактериальное окисление железа повлияет на содержание урана в продуктивном растворе.

Переход от лабораторных исследований к пилотному производству и последующему промышленному применению связан с рядом факторов, которые трудно моделировать в лабораторных условиях:

1. Состав растворов выщелачивания отличается от модельных составов, используемых для выращивания бактерий, главным образом значительным содержанием солей (до 25 г/л).

2. Содержание Fe²⁺ железа не превышает 3 г/л, тогда как в моделируемых условиях оно может достигать 10 г/л. Относительно низкое содержание двухвалентного железа в растворе требует более тонкой настройки технологии с учетом факторов масштаба.

3. Температура раствора (10-14°C) значительно отличается от оптимальной (25-35°C). Затраты на нагрев значительно выше потенциального эффекта от использования раствора при объемах потока выщелачивающего раствора (2000 м³/ч). Попытки довести температуру раствора до оптимальной для бактерий потребовали бы затрат, сравнимых со стоимостью готового продукта.

4. Условия эксплуатации биореакторов в проточном режиме отличаются от модельных лабораторных условий, даже если состав растворов совпадает.

5. Продолжительность прохождения растворов выщелачивания (более 20 дней) через рудоносный слой и разнообразие физических и химических процессов, происходящих в рудоносном слое.

Основной проблемой при реализации проекта такого масштаба является установление связи между работой установок бактериального окисления железа (БОЖ) и увеличением содержания урана в продуктивном растворе [31]. Моделирование сложных процессов, происходящих

в рудоносном слое, затрудняется изменчивостью вещественного состава рудоносного слоя и его изменениями по мере прохождения раствора через рудный слой на глубине 20-35 м и более, в зависимости от месторождения (на некоторых месторождениях более 700 м). Анализ результатов использования перекиси водорода (химического окислителя) на руднике Семизбай позволил выдвинуть ряд предположений о том, что активированный раствор выщелачивания после бактериального окисления железа в би.

Анализ результатов использования перекиси водорода (химического окислителя) на руднике Семизбай позволил выдвинуть ряд предположений о том, что активированный раствор выщелачивания после бактериального окисления железа в биореакторах повлияет на содержание урана в промывочной жидкости. Исследования, проведенные различными специалистами и нами в лабораторных условиях, показали перспективы использования бактериального окисления железа, при котором скорость окисления урана увеличивается в несколько раз. В такой ситуации только прямые испытания на отдельном участке позволяют понять и изучить влияние бактериального окисления железа на содержание урана в продуктивном растворе и определить перспективы этой технологии. Объемы подаваемого раствора для выщелачивания составляют в среднем от 30 до 50 м³/ч для отдельного блока месторождения. Необходимо было провести пилотные испытания на отдельной установке с расходом раствора более 20 м³/ч, что в годовом выражении составляет более 150 тысяч м³/год.

Для оценки промышленного применения технологии бактериального окисления железа (БОЖ) на урановом месторождении была разработана геотехнологическая модель, основанная на матричных балансах. Расчеты для уранового месторождения Семизбай показали следующее:

а) Объем активного раствора, используемого в циркуляции на этом месторождении при подаче раствора 2000 м³/ч, составляет около 800 тысяч – 1 миллиона м³ в год, при этом через рудоносный слой проходит до 14 миллионов м³ раствора.

б) При средней толщине рудоносного слоя около 10 м и наличии около 1000 (фактически до 1031) скважин, работающих на расстоянии 25 м друг от друга, обрабатывается около 6-8 миллионов м³ рудоносного слоя в этом подземном реакторе. Это общий объем «подземного реактора» для подземного *insitu* выщелачивания урана на этом месторождении.

в) Месторождение разделено на блоки, которые находятся на разных стадиях: кислотизации, активного или пассивного выщелачивания, в зависимости от периода разработки блока. В настоящее время используется около 30 таких блоков, где установлено динамическое равновесие.

г) Месторождение Семизбай представляет собой совокупность относительно независимых 30 подземных реакторов, каждый из которых обрабатывает рудоносный слой объемом около 200-300 тысяч м³ в год, при этом каждый блок содержит в среднем около 30 тысяч м³ раствора выщелачивания.

е) При таком подходе исследуемое урановое месторождение соответствует горнодобывающему предприятию с объемом переработки 1-2 миллиона тонн руды в год.

2. Материалы и методы

Для тестирования использовались две установки с компрессорной станцией (до 500 м³/ч каждая) и насосной станцией с производительностью до 40 м³/ч. Проточные биореакторы объемом 20 м³ обеспечивали свободный поток раствора с минимальным выносом бактерий из биореактора благодаря конструкции оборудования. Насосная станция с частотным преобразователем и накопительным резервуаром обеспечивала подачу раствора в основную сеть под давлением более 8 бар. После биореакторов активированный раствор выщелачивания подавался в нагнетательные скважины. Измерения содержания железа в растворе, серной кислоты, pH, окислительно-восстановительных показателей и содержания урана в продуктивном растворе проводились шахтной лабораторией в текущем режиме. Подача раствора в биореакторы регулировалась кранами на основе данных электромагнитных расходомеров типа «Omega». Разработка проекта установки и её монтаж были выполнены исследовательской лабораторией «БиоГеоТехнология золота, урана и полиметаллических руд» (Университет Сатпаева).

Предварительное накопление биомассы осуществлялось на среде Сильвестра-Лэнгмюра. Накопленную биомассу однократно загружали в биореакторы. В течение месяца биомасса накапливалась в биореакторах в режиме культивирования. Накопление биомассы проводилось в режиме барботаж с подачей воздуха компрессором. Раствор периодически обновлялся по мере перехода двухвалентного железа в трехвалентное состояние. Ежедневные измерения проводились в химической лаборатории шахты.

Тесты проводились в 2018-2019 годах. Раствор подавался на две установки под кодовыми названиями BOI-1 и BOI-2 (бактериальное окисление железа) с объемом подачи 15 м³/ч круглосуточно. С июня 2019 года только установка BOI-1 работала в проточном режиме. Через две недели обе установки были запущены вместе. Общий объем раствора, подаваемого на установку, составлял 30 м³/ч. Дополнительная подача серной кислоты не производилась.

Объем активированного раствора выщелачивания, подаваемого на установки, составлял 30 м³/ч, при этом общий объем подачи раствора в нагнетательные скважины достигал 40 м³/ч. Смешивание активированного раствора выщелачивания и водного раствора несколько снижало окислительно-восстановительный показатель раствора и содержание трехвалентного железа в растворе. Данные о содержании целевого металла в продуктивном растворе определялись в обычном режиме непосредственно сотрудниками шахты Семизбай [32].

3. Результаты и обсуждение

На графике представлены данные о содержании урана в продуктивном растворе с начала 2018 года. Стрелками указано время запуска установок подачи активированного раствора выщелачивания. Содержание серной кислоты в растворе для выщелачивания составляло 3,5-4,5 г/л. Испытания проводились без дополнительной подачи кислоты. Наблюдается явная тенденция к снижению содержания урана до начала работы установок. После включения второй установки и достижения подачи 30

м³/ч происходит устойчивый рост содержания урана в продуктивном растворе, что позволило предположить, что испытания достигли своей поставленной цели.

Учитывая, что время реакции системы на воздействие модифицированного раствора выщелачивания составляет не менее 20 дней, можно отметить, что увеличение содержания урана в продуктивном растворе произошло после запуска био-установок. Для отдельных скважин на блоке рост составил более 50 %, среднее значение по блоку было 10-20 %.

Испытания проводились без добавления серной кислоты. Условия, при которых происходит бактериальное окисление железа, соответствуют условиям подземного *in situ* выщелачивания урана по содержанию серной кислоты в растворе (от 3 г/л до 25 г/л), уровню pH (1,5-2,5), окислительно-восстановительному потенциалу (360 мВ и выше), температуре и другим технологическим параметрам. Мобильное исполнение био-установок в контейнерах позволяет перемещать оборудование на проблемные блоки для решения локальных задач. Полученные данные позволили определить несколько вариантов промышленного внедрения технологии на руднике. На основе проведенных испытаний было решено провести дополнительные исследования с добавлением «свободной» серной кислоты, что улучшит работу биореакторов в растворах выщелачивания. Испытания проводились в сложных природных условиях, при этом температура воздуха зимой достигала -40°C.

4. Выводы

1. Проведены исследования на одном из блоков уранового месторождения с промышленными объемами потока растворов выщелачивания. Исследования показали влияние окисления железа штаммами *A. ferrooxidans* в проточных биореакторах на содержание урана в продуктивном растворе, несмотря на сложный вещественный состав рудного тела. Усредненные показатели содержания урана в продуктивном растворе за год для данного блока подтвердили этот эффект.

2. Окислительно-восстановительный потенциал раствора увеличился с 360 мВ до 430-450 мВ в проточном режиме после прохождения раствора выщелачивания через биореакторы. Содержание трехвалентного железа возросло с 0,1 г/л до 1,5 г/л и выше.

3. Процесс бактериального окисления железа в растворе происходил при температуре раствора 10-12°C (оптимальная температура составляет 25-35°C), что позволило избежать затрат на подогрев раствора.

4. Результаты испытаний показали увеличение содержания урана в продуктивном растворе на 10-20 % после прохождения раствора выщелачивания через рудоносный слой.

5. Операционные затраты при использовании проточных биореакторов оказались в 6-8 раз ниже, чем при использовании химических окислителей (перекиси водорода).

6. Промышленные испытания подтвердили потенциал данной технологии, а также данные, полученные в лаборатории. Испытания позволили определить технологические параметры для реализации промышленной био-установки для обработки всего объема раствора выщелачивания на руднике и установить технологические требования к оборудованию для промышленного применения.

References / Литература

- [1] Kolmer, A., Templ, K. & Hinkl, M. (1950). Bakterii, oksilajushhie zhelezo, iz kislyh stochnyh vod nekotoryh ugol'nyh shah. *Zhurnal bakteriologii*, (59), 317-328. <https://doi.org/10.1128/jb.59.3.317-328.1950>
- [2] Briner, L., Bek, Dzh., Djevis, D. & Uilson, D. (1954). Mikroorganizmy v processe vyshhelachivaniya sul'fidnyh mineralov. *Pro-myshlennaja i inzhenernaja himija*, (46), 2587-2592. <https://doi.org/10.1021/ie50540a051>
- [3] Polkin, S.I., Adamov, E.V. & Panin, V.V. (1982). *Tehnologija bakterial'nogo vyshhelachivaniya cvetnyh i redkih metal'lov*. M.: Nedra
- [4] Brandl H. (2001). *Biotehnologija*. Wiley
- [5] Harrison, V., Gou, V., Ivarson, K. (1966). Vyshhelachivanie urana iz rudy mestorozhdeniya Jelliot Lejk v prisutstvii bakterij. *Kanadskij mineralogicheskij zhurnal*, (87), 64-67
- [6] Hamidian, H., Rezai, B. & Milani, S. (2009). Mikrobnoe vyshhelachivanie uranovoj rudy. *Aziatskij zhurnal himii*, (21), 5808-5820
- [7] Guaj, R., Sil'ver, M. & Torma, E. (1976). Mikrobiologicheskoe vyshhelachivanie nizkosortnoj uranovoj rudy bakterijami **Thiobacillus ferrooxidans**. *Prikladnaja mikrobiologija i biotehnologija*, (3), 157-167
- [8] Tuovinen O., Bhatti T. (1999). Mikrobiologicheskoe vyshhelachivanie uranovyh rud. *Metallurgicheskie i mineral'nye processy*, (16), 51-60. <https://doi.org/10.1007/BF03403234>
- [9] Mun'os H., Gonsales F., Blazkes M., Ballester A. (1995). Issledovanie biovyshhelachivaniya uranovoj rudy Ispanii. Chast' I: Obzor bakterial'nogo vyshhelachivaniya uranovyh rud. *Gidrometallurgija*, (38), 39-57. [https://doi.org/10.1016/0304-386X\(94\)00039-6](https://doi.org/10.1016/0304-386X(94)00039-6)
- [10] Roulings, D. (2004). Chistaja i prikladnaja himija.
- [11] Roulings, D. (2005). Harakteristiki i adaptacija mikroorganizmov, oksilajushhih zhelezo i seru, dlja izvlecheniya metallov iz mineralov i ih koncentratov. *Mikrobnye kle-tochnye fabriki*, (4), 15
- [12] Kavatra, S., Nataradzhan, K. (2001). Mineral'naja biotehnologija: mikrobnye aspekty obogashheniya mineralov, izvlecheniya metallov i jekologicheskogo kontrolja. *SME*, 101-119
- [13] Brajerli, Dzh. (1978). Termofil'nye bakterii, oksilajushhie zhelezo, obnaruzhennye na svalkah mednyh vyshhelachivaniy. *Prikladnaja i jekologicheskaja mikrobiologija*, (36), 523-525. <https://doi.org/10.1128/aem.36.3.523-525.1978>
- [14] Brajerli, Dzh., Norris, P., Kelli, D. & LeRu, N. (1978). Harakteristiki umerenno termofil'nyh i acidofil'nyh zhelezooksilajushhih **Thiobacillus**. *Evropejskij zhurnal prikladnoj mikrobiologii*, 291-299
- [15] Holms, D. (1988). Biotehnologija v gornoj promyshlennosti i metallurgicheskoy pererabotke: vyzovy i vozmozhnosti. *Metallurgicheskie i mineral'nye processy*, (5), 49-56
- [16] Blje, Zh., Tjagi, R., Men'e, N. & Okljer, Zh. (1994). Proizvodstvo vnekletochnyh otrostkov vo vremja bakterial'noj kolonizacii jelementnoj sery. *Processnaja biohimija*, (29), 475-482
- [17] Tvardovska, I. (1986). Rol' **Thiobacillus ferrooxidans** v okislenii pirita na ugol'nyh svalkah. I: Model'nye is-sledovaniya. *Acta Microbiol. Pol.*, (35), 291-304
- [18] Tvardovska, I. (1987). Rol' **Thiobacillus ferrooxidans** v okislenii pirita na ugol'nyh svalkah. II: Issledovanie obrazcov, vzjatyh so svalok. *Acta Microbiol. Pol.*, (36), 101-107
- [19] Brajerli, K., Briggs, A. (2002). Vyb or i raschet oborudovaniya i shem biookisleniya. *Dizajn, praktika i kontrol' mineral'nyh predpriyatij*, 2002, 1540-1568
- [20] Pronk, J., de Bruijn, J., Bos, P. & Kjunen, Dzh. (1992). Anajerobnyj rost **Thiobacillus ferrooxidans**. *Prikladnaja i jekologicheskaja mikrobiologija*, (58), 2227-2230. <https://doi.org/10.1128/aem.58.7.2227-2230.1992>
- [21] Barrett, Dzh., H'juz, M., Karavajko, G. & Spenser, P. (1993). Izvlechenie metallov putem bakterial'nogo okisleniya mineralov. Ellis Harwood, 127-134

- [22] Serda, H., Gonsales, S., Rios, H. & Kintana, T. (1993). Bio-proizvodstvo uranovykh koncentratov v Ispanii: primer issledovaniya. *FEMS Microbiol. Rev.*, (11), 253–260
- [23] Shippers, A., Hall'mann, R. & Vencien, S. (1995). Mikrob-noe raznoobrazie v othodakh uranovykh shaht. *Prikladnaya i jeologicheskaja mikrobiologiya.*, (61), 2930–2935. <https://doi.org/10.1128/aem.61.8.2930-2935.1995>
- [24] Benedetto, Dzh., de Almeida, S., Gomes, H. & Vazoller, R. (2005). Monitoring sul'fatvosstanavlivajushhih bakterij v kisloj vode uranovykh shaht. *Mineral'noe inzhenernoe delo*, (18), 1341–1343. <https://doi.org/10.1016/j.mineng.2005.08.012>
- [25] MakKridi, R., Guld, V. (1990). Biovyshhelachivanie urana. Vosstanovlenie mikrobnih mineralov. McGraw-Hill, N'ju-Jork, 107–126
- [26] Garsija Dzhunior O. (1993). Bakterial'noe vyshhelachivanie uranovoj rudy iz Figejra, Parana, Braziliya: laborator-nye i pilotnye issledovaniya. *FEMS Microbiol. Rev.*, (11), 237–242. [https://doi.org/10.1016/0168-6445\(93\)90047-D](https://doi.org/10.1016/0168-6445(93)90047-D)
- [27] Dvivedi, K., Mathur, A. (1995). Biovyshhelachivanie – nash opyt. *Gidrometallurgija*, (38), 99–109. [https://doi.org/10.1016/0304-386X\(94\)00034-Z](https://doi.org/10.1016/0304-386X(94)00034-Z)
- [28] Czjango, Z., Shaocin, Ch., Sun', R. & Czin, C. (2004). Analiz i ocenka vody iz neskol'kih rajonov pererabotki urana, obrabotka zhidkih stochnyh vod s uranovykh shaht i zavodov. IAEA-1419, Vena
- [29] Kampbell, K., Gallegos, T. & Landa, Je. (2015). Biogeohimicheskie aspekty uranovoj mineralizacii, dobychi, pererabotki i rekul'tivacii. *Prikladnaja geohimija*, (57), 206–235. <https://doi.org/10.1016/j.apgeochem.2014.07.022>
- [30] Uotling, H. (2015). Obzor biogidrometallurgicheskogo izvlecheniya metallov iz polimetallicheskikh mineral'nyh resursov. *Minerals*, 5(1), 1–60
- [31] Bektai, E.K., Turysbekova, G.S., Meretukov, M.E. & Bektai, M.E. (2018). Prirodnye nanochasticy i nanostruktury. Almaty, KazNTU

Уранды жерасты шаймалау технологияларында темірдің бактериялық тотығын өнеркәсіптік қолдану

Е. Бектай, Г. Турысбекова, Б. Шидерин*, М. Бектаев

Satbayev University, Алматы, Қазақстан

*Корреспонденция үшін автор: shbaur@mail.ru

Андатпа. Қазақстандағы уран кен орнында 12 ай бойы жүргізілген пилоттық сынақтардың нәтижелерімен расталған жер асты (insitu) уранды шаймалау процесінде темірді бактериялық тотықтыру технологиясы әзірленіп, өнеркәсіптік қолдануға ұсынылды. Зерттеудің мақсаты – жаңа типті ағынды биореакторларды пайдалана отырып, жер асты «insitu» уранды шаймалау процесінде темірді бактериялық тотықтыру технологиясын әзірлеу болды. Сыйымдылығы 20 м³ екі биотехнологиялық қондырғы құрылып, 40 футтық контейнерлерге орнатылды. Геотехнологиялық полигонға қойылған биореакторлар құбыр жүйесімен, ауа компрессорларымен, сорғы станциясымен және бақылау-өлшеу құралдарымен жабдықталып, ұңғымалар арқылы уранды жер асты шаймалау жүйесіне қосылды. Қондырғылардың өнімділігі шаймалау ерітіндісі үшін жылына 150 000 м³-ден асты. Ерітінді биореакторлардан өткеннен кейін, тотығу-қалпына келтіру потенциалы 360 мВ-тан 430–450 мВ-қа дейін артты. Үш валентті темірдің мөлшері 0,1 г/л-ден 1,5 г/л және одан жоғары деңгейге дейін өсті. Темірді бактериялық тотықтыру процесі ерітінді температурасы 10–12°C кезінде жүргізілді (оңтайлы температура – 25–35°C), бұл ерітіндіні жылытуға кететін шығындарды болдырмауға мүмкіндік берді. Сынақ нәтижелері шаймалау ерітіндісі уран қабатынан бір ай бойы өткеннен кейін өнімді ерітіндідегі уран мөлшерінің 10–20% артқанын көрсетті. Бұл технологияның жер асты ұңғымалы insitu уранды шаймалау үшін перспективалы екенін растады. Технологияны қолданудың экономикалық шығындары химиялық тотықтырғыштарды, мысалы, сутегі асқын тотығын пайдалану шығындарынан 6–8 есе төмен. Алынған өнеркәсіптік нәтижелер алғаш рет биотехнологиялық әдістерді жер асты ұңғымалы insitu уранды және басқа да металдарды шаймалау үшін қолданудың жаңа мүмкіндіктерін ашты.

Негізгі сөздер: уран, жер асты шаймалау, insitu, биошаймалау, екі валентті темір, үш валентті темір, нанобөлшектер, темір тотықтырғыш бактериялар.

Промышленное использование бактериального окисления железа в технологиях подземного выщелачивания урана

Е. Бектай, Г. Турысбекова, Б. Шидерин*, М. Бектаев

Satbayev University, Алматы, Казахстан

*Автор для корреспонденции: shbaur@mail.ru

Аннотация. Разработана и предложена для промышленного использования технология бактериального окисления железа в процессе подземного (insitu) выщелачивания урана. Технология была подтверждена результатами пилотных испытаний на урановом месторождении в Казахстане в течение 12 месяцев. Целью исследования являлась разработка технологии бактериального окисления железа в процессе подземного «insitu» выщелачивания урана с использованием нового типа проточных биореакторов. Были созданы две биотехнологические установки с биореакторами объемом 20

м³, установленные в 40-футовых контейнерах. Биореакторы, оснащенные обвязкой, воздушными компрессорами, насосной станцией и контрольно-измерительной аппаратурой, были установлены на геотехнологическом полигоне и подключены к основной системе подземного выщелачивания урана через скважины. Производительность установок составила более 150 000 м³/год для выщелачивающего раствора. После прохождения раствора через биореакторы, окислительно-восстановительный потенциал раствора увеличился с 360 мВ до 430-450 мВ в проточном режиме. Содержание трехвалентного железа увеличилось с 0,1 г/л до 1,5 г/л и выше. Процесс бактериального окисления железа проводился при температуре раствора от 10 до 12°C (оптимальная температура — 25-35°C), что позволило исключить затраты на нагрев раствора. Результаты испытаний показали увеличение содержания урана в продуктивном растворе на 10-20 % после прохождения выщелачивающего раствора через рудоносный слой в течение 1 месяца. Это подтвердило перспективность использования данной технологии для подземного скважинного *insitu* выщелачивания урана. Экономические затраты на применение технологии в 6-8 раз ниже по сравнению с использованием химических окислителей, таких как пероксид водорода. Полученные промышленные результаты впервые открывают новые перспективы для применения биотехнологических методов подземного скважинного *insitu* выщелачивания урана и других металлов.

Ключевые слова: уран, подземное выщелачивание, *insitu*, биовыщелачивание, двухвалентное железо, трехвалентное железо, наночастицы, бактерии, окисляющие железо.

Received: 17 July 2024

Accepted: 15 October 2024

Available online: 31 October 2024

Paleogeographical reconstruction of the late neogene in the north-eastern part of Central Kazakhstan (The «Goose Passage» Site)

B.U. Baishashov¹, S.A. Nigmatova¹, A.L. Seidali¹, I.T. Madiyarova^{1*}, Spenser G. Lucas²

¹Institute of Geological Sciences named after K.I. Satpayev, Almaty, Kazakhstan

²Museum of Natural History, New Mexico, USA

*Corresponding author: ilnura_elya@mail.ru

Abstract. The study and identification of regularities of geological and paleogeographic development of Central Kazakhstan in the Cenozoic is fundamentally important for understanding the geological processes of Eurasia as a whole, as they were reflected in the marine and continental landscapes of the adjacent regions of Western Kazakhstan, Central Asia and Western Siberia. Practically from the beginning of the Cenozoic, a continental mode of sedimentation was established here, with landscapes of denudation plains and low highlands. Organic remains make it possible to dissect the Cenozoic continental strata and reconstruct the stages of landscape development from typically tropical and subtropical in the Paleocene and Eocene to steppe and savannah landscapes by the beginning of the Quaternary. The Goose Flight fauna locality is a stratotype of the Pliocene Pavlodar Formation. It is one of the largest localities of Miocene Hipparion fauna of Eurasia, located in the north-eastern part of Central Kazakhstan, on the Irtysh River, within the city limits of Pavlodar. The location «Goose flight» is comparable to such widely known localities of Hipparion fauna as Taralyk-Cher and Kholu (Russia, Tuva), Baode fauna in Shansi province in China, Grebeniki and Berislavsky in Ukraine, Taraclia in Moldova. The locality needs protection and defence as it is destroyed due to erosion of the banks of the Irtysh River and uncontrolled sampling. The article provides a description of the Pavlodar Formation sediments, its geological and palynological characteristics, as well as the history of the study of the Goose Flight locality, the most complete list of fossils, gives their environmental characteristics and concludes on the conditions of accumulation of the Pavlodar Formation strata.

Keywords: *Hipparion fauna, Pavlodar Formation, Late Miocene, paleogeography, Central Kazakhstan.*

1. Introduction

The study and identification of patterns of geological and paleogeographic development of Central Kazakhstan in the Cenozoic is fundamentally important for understanding the geological processes of Eurasia as a whole, since they were reflected in the marine and continental landscapes of the adjacent regions, being a connecting link and one of the main sources of sedimentary material removal. Practically from the beginning of the Cenozoic, a largely continental sedimentation regime had established here, forming the landscapes of denudation plains and low highlands.

The study of organic remains allowed reconstructing the changes in the geological situation, climate and biological diversity in Cenozoic times, as well as tracing the stages of landscape development from typically tropical and subtropical in the Paleocene and Eocene, to steppe and savanna by the beginning of the Quaternary. The study of the remains of Cenozoic flora and fauna is of great importance for the division and correlation of continental sediments. At the same time, each site adds new data to the mosaic reconstruction picture of the past environment.

Currently, on the territory of Central Kazakhstan, mainly in its western part, a large number of sites of leaf flora (imprints) and fauna of Oligocene vertebrates have been identified. The macroorganic Miocene sites occur in much

smaller quantities, and the Quaternary ones are still unknown. Particularly well represented are the Oligocene and Early Miocene deposits, which contain rich paleontological material, on the basis of which the relative age of the deposits was determined and the past paleogeographic conditions were reconstructed. At a later time, the accumulation of sediments with remains of flora and fauna occurred much less frequently and more fragmentarily, which is associated both with a change in the type of vegetation (from mixed-deciduous forests in the Paleogene to steppes and deserts of the Quaternary), and with the general aridization of the climate and changing sedimentation conditions.

Late Neogene deposits, reflecting the initial stage of desertification of the territory of Kazakhstan, are widely represented in Central and North-Eastern Kazakhstan and are classified as the Pavlodar Suite. Its age is established as late Miocene. The stratotype of the Pavlodar Suite are sediments with a complex of classical hipparion fauna, exposed on the right bank of the Irtysh River, within the city of Pavlodar area (north-eastern part of Central Kazakhstan). One of the largest in Eurasia sites of hipparion fauna titled «Goose Passage» is located here, on the cliff of the floodplain terrace (Figure 1).

The site needs due protection and guarding, as it is being destroyed by the erosion of the Irtysh River banks and by uncontrolled sampling.

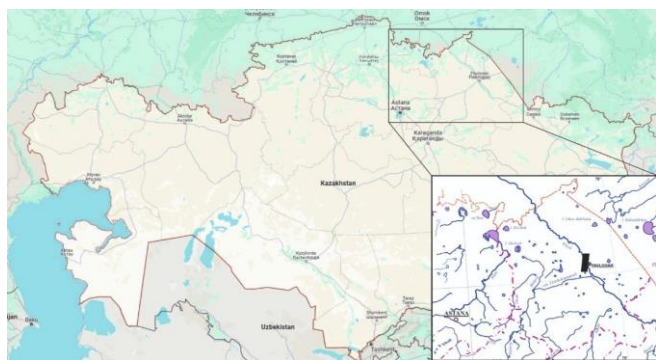


Figure 1. The location of the «Goose Passage» hipparion fauna site

Analysis of the compositional features of the «Goose Passage» fauna, as well as of the lithological, sedimentological and palynological characteristics of the host sediments, enables to reconstruct the paleoecological environment of the time of accumulation of these strata, the stages of development of the Neogene climate of Central Kazakhstan and replenish the paleobiogeographic materials.

2. Materials and methods

The proposed article rests on the paleontological materials previously obtained by B.U. Baishashov, as well as on data acquired during the study of numerous paleontological collections of different years at the «Goose Passage» site and stored mainly in the funds of the Institute of Zoology at the RK MES, as well as in the Pavlodar City Museum and the Paleontological Museum at the Russian Academy of Sciences (Moscow). For paleontological study, the taxonomic affiliation of the material was determined by measuring and comparing distinctive features with previously described reference samples.

Methodology consists in itinerary studies of the right bank of the Irtysh River, a layer-by-layer description of the section. The bones of vertebrates are deposited in red-brown clays with interlayers of greenish-brown dense sandy clays, in places turning into dense sandy loam. During field work, samples were taken for palynological analysis. Because of the site's location in the city park, the samples were taken out not from the cleared section, but from small clearings. For palynological analysis, samples were taken from the layers containing vertebrate bones and from the underlying and overlying sediments.

Also, materials acquired during the 2022-2023 field studies were utilised in the article in order to study sections of red-colored late Miocene clays commonly spread in Central, Eastern and South-Eastern Kazakhstan.

Palynological analysis of the samples was carried out in the palynological laboratory of the K.I. Satpayev Institute of Geological Sciences (Almaty), using generally accepted chemical processing techniques [40]. The method provides for the following sequence of work: 1) samples are treated with a 10% HCl solution to remove carbonates; 2) the samples are treated with a 5% solution of $\text{Na}_4\text{P}_2\text{O}_7 \cdot \text{H}_2\text{O}$ to free them from clay particles, then are washed in distilled water; 3) the resulting sediment was centrifuged in a solution of heavy liquid [$\text{K}_2(\text{CdI}_4)$] with a specific gravity of 2.25-2.4 to separate the mineral and organic fractions. The macerate was treated with HF to remove silicate minerals. The resulting macerate was placed for storage in test tubes with glycerin. The macerate was not subject of sieving. The collection of palynological preparations is stored in the laboratory of Mesozoic and Cenozoic geology of the K.I. Satpayev Institute of Geological Sciences.

The study of palynomorphs was carried out with the Axio-starplus optical microscope (CarlZeiss) at a working magnification of $\times 400$ and $\times 600$. Isolated from the red sediments were few amounts of palynomorphs, therefore all encountered specimens were counted: spores and pollen of plants, green algae, and fungi. Plant spores and pollen were identified to genus or family (in case of poor preservation).

2.1. The site study history and its current state

The study of this section has a history of more than a century [24]. In 1928, Yu.A. Orlov, on the territory of the city of Pavlodar, discovered one of the largest sites of the hipparion fauna of Eurasia, later called «Goose Passage». In 1929-1930, during excavations, employees of the Paleontological Institute of the USSR Academy of Sciences (now the A.A. Borisyak Paleontological Institute of the Russian Academy of Sciences) collected several thousand bone remains of vertebrates [35-39]. A special exhibition was created in the Paleontological Museum of the USSR, occupying a separate room, where the collected skeletons of hipparions, rhinoceroses and other animals were placed.

Since 1950s, the excavations were carried out by paleontologists of the Institute of Zoology at the Kazakh SSR Academy of Sciences, however, the found representative materials were scanty. In 1976, B.U. Baishashov, an employee of the Institute of Zoology, organized a special expedition and large excavations (Figures 2, 3, 4) using machinery. As a result, for the first time, more than 10 skulls of the rhinoceros *Chilotheria* alone and many bones of other mammals were obtained in the form of monoliths. This material allowed identifying distinctive features and describing a new species for science - *Chilotherium orlovi* Baishashov, 1982 [5]. Most often in these deposits are the bones of hipparions, extinct equine mammals. They were widespread in the Miocene, and therefore the fauna was called hipparionian.



Figure 2. The bone-bed clearing at the «Goose Passage» site, 1976 (the B.U. Baishashov archive)

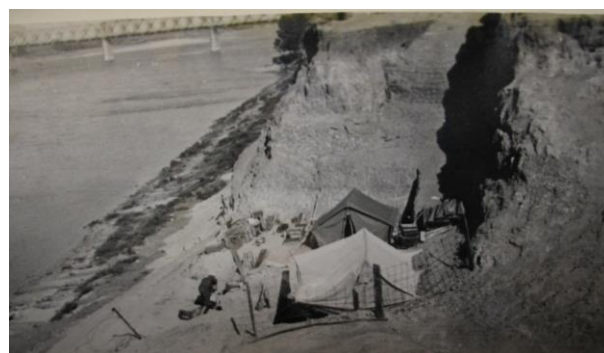


Figure 3. Excavation in progress, 1976 (the B.U. Baishashov archive)



Figure 4. B.U. Baishashov at the opening of bones and preparation of the monolith, 1976 (the B.U. Baishashov archive)

As a result of many years of research by specialists from Russia and Kazakhstan (B.U. Baishashov, F.A. Tleuberdina, V.V. Lavrov, L.L. Gaiduchenko and many others), more than 60 species of vertebrates of the hipparion fauna were identified at the «Goose Passage» site.

The question of the need for protection (geoconservation) of the «Goose Passage» site has been repeatedly raised by the scientific community since the mid-1950s. On December 7, 1971, the site of the hipparion fauna «Goose Passage» was declared a natural monument of republican significance and taken under state protection. In 1979, the Institute of Zoology of the Academy of Sciences of the Kazakh SSR and the Central Council of the Kazakh Society for Nature Conservation took the initiative to create the «Open Air Museum – «Goose Passage» to preserve this natural monument as a national treasure of the Republic of Kazakhstan, which represents a prototype of the fauna of African savannas with a variety of representatives of the ancient animal world.

In 1988, a decree was issued prohibiting spontaneous excavations on the territory of the «Goose Passage» natural monument without the appropriate permission.

In 2002, in the course of joint work carried out by employees of the Institute of Zoology (Almaty) and the Toraigrov Pavlodar State University (Pavlodar), a number of measures were proposed to preserve this unique site [8].



Figure 5. The «Goose Passage» site. General view at present

To this day, the monument, despite repeated excavations, is far from being exhausted. Every year, after the Irtysh river floods and the collapse of the coastline caused by spring floods, a bone-bearing horizon is getting exposed here. Currently, for scientific purposes, quite a large amount of material has been acquired to the collections of the Paleontological Institute of the Russian Academy of Sciences (Moscow) and the Institute of Zoology of the Ministry of Education and Science of the Republic of Kazakhstan (Almaty) and there is no

need to conduct new excavations. Scientific processing of available material, showing the importance of this unique site in reconstructing the landscape and climatic conditions of the past, is going on [10]. Despite the adopted statutory measures, actually the natural monument «Goose Passage» remain neglected and left to deteriorate.

3. Results and discussion

3.1. Geological description of the section

The Pavlodar Formation ($N_{1-2} pv$) was identified in 1951 by V.V. Lavrov. The stratotype is described from deposits of the «Goose Passage» site, with the remains of a hipparion fauna. The age is determined by the vertebrate fauna and spore-pollen complexes as in the Upper Miocene - Lower Pliocene, Messinian-Zanclean stages.

The formation sections in the area are quite similar and are represented by lithologically homogeneous clays of brownish tints. They lie under Quaternary sediments of different ages. They are often separated from the underlying formations by a basal interval represented by sandy clays with gravel and pebbles. The thickness of the formation is 30-40 m.

Deposits of the Pavlodar formation are widespread and correlate with the sequence of the same name in the West Siberian Plain and Turgai [29]: it overlies the Aral (Kalkaman) (Bayshashov et al., 2015) formation and has a two-member structure, where sands lie at the base, above clay. The most typical rocks are red-brown clays. It is a carbonate formation with abundant marl nodules and interbeds. The deposits are saturated with fine-silty carbonates and also include calcareous-marly and, less commonly, gypsum nodules ranging in size from 3 to 7 cm. Sand in clays is noted both in a dispersed form and in the form of interlayers and lenses. Sandy-gravel deposits with pebbles often occur at the base of the formation. The paleontological characteristics are also similar, with common main species of animals and pollen of herbaceous plants, with a slight admixture of pollen of tree forms.

The Pavlodar Suite section. Compiled by B.U. Baishashov upon the 2022 filed work.

According to the European stratigraphic scale, this is the Turolian fauna of the late Miocene.

Middle-Upper Miocene. Serravalian - Messinian stages. Kalkaman Suite ($N_{1-2}^{2-3} kl$). It is represented by green gypsum-bearing clays of montmorillonite-hydromica composition, containing large druses of gypsum, interlayers of marls, dark gray clays, sands, and silts (40 m). The age is based on the vertebrate fauna in the adjacent area (along the Irtysh River).

Upper Miocene - Lower Pliocene. Messinian - Zanklian stages. The Pavlodar Suite ($N_{1-2} pv$) is represented by deposits of different genesis, dominated by red-brown and green clays with interlayers of sand, loam, sand and gravel material, and characterized by calcareous-marly nodules (20-30 m). The age of the formation is established based on the mammal fauna.

Upper Pliocene. Piacenza Stage. The Irtysh Suite (N_2^{2irt}) is represented by bluish and brownish silty clays with sand interlayers (50 m). Irtysh Suite in outcrop near the village Lebyazhy along the river Irtysh and contains a fauna of mammals, freshwater mollusks and ostracods, which allows parallelizing it with the Bitekey Suite of the upper Neogene [4].

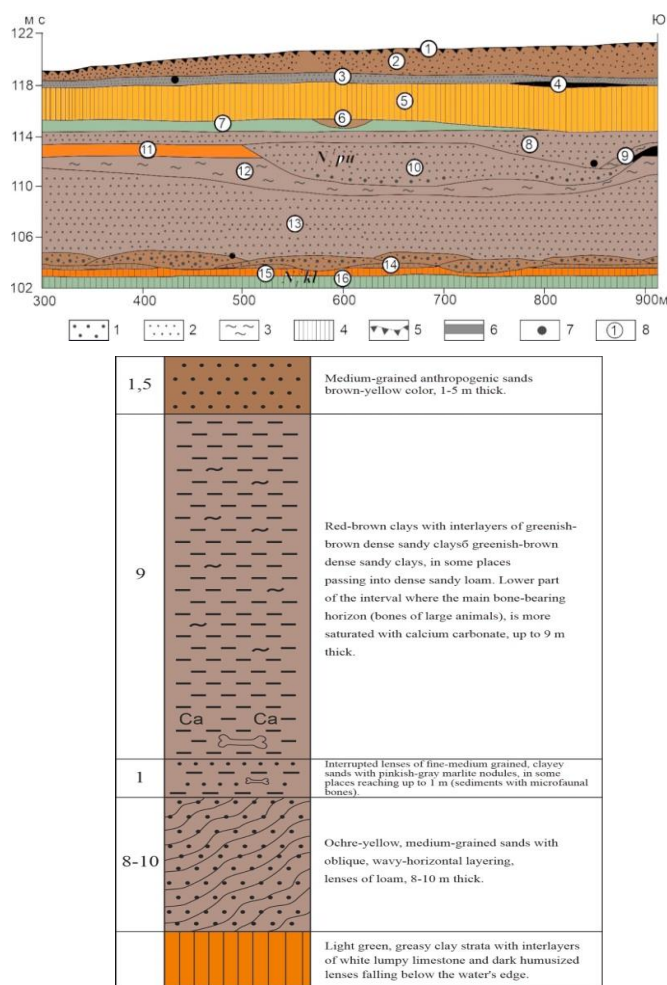


Figure 6. The section of the Pavlodar Suite according to [Zykin, 1982]



Figure 7. The «Goose Passage». Decaying bones



Figure 8. The «Goose Passage». Bones along with the rock material are exposed and washed away from the cliff wall

3.2. Palynological study

Clays of the Pavlodar suite contain single grains of pollen of xerophytic plants, and only small quantities of tree pollen are present: *Betulasp.*, *Alnussp.*, *Corylussp.*, *Pinusstrobus*, *R.sibirica*.

In the lower part of the section (palynocomplex 1, 2), encountered were pollen of the oak *Quercussp.*, hornbeam *Carpinus*sp., hazel *Corylus*sp., and the pollen of herbaceous forms is characterized by the dominance of pollen of cereals and wormwood.

The upper part of the section (palynocomplex 3) contains mainly pollen of herbaceous plants: wormwood, goosefoot and grasses, which indicates the development of treeless steppe landscapes on watersheds.

Palynocomplex 1:

Arboreal pollen 4-16%: *Pinus*, *Betula*, *Ulmus*, *Alnus*, single *Carpinus*, *Quercus*, *Salix*.

Herbaceous: 83-96%: pollen dominated by *Poaceae* (78%), *Chenopodiaceae*, *Artemisia*.

Palynocomplex2:

Arboreal ones make up 21-47% of all pollen forms encountered: a relative increase in the proportion of *Pinus* (50-80% of all arboreal ones), *Betula* (12-38%) and *Picea*, *Corylus*, *Alnus*, *Quercus* are also present.

Herbaceous species make up 53-79%: *Artemisia* and *Chenopodiaceae* predominate, forbs are represented by pollen of *Asteraceae* and cereals of *Poaceae*.

Palynocomplex3:

Arboreal ones make up 2-10%, mainly *Pinus* and *Betula* pollen.

Herbaceous-shrubs dominate in the spectra -95-100%, *Artemisia* predominates among them (80%) and also present are *Chenopodiaceae*, *Asteraceae*, *Poaceae*.

The composition of pollen and spores indicates the development of xerophilic vegetation and the existence of floodplain temperate-deciduous forests in river beds. These are probably elements preserved from earlier, heat-loving floras of the «Turgai ecological type», which became widespread in the late Oligocene-early Miocene and are well studied from leaf prints from the sites of Turgai, Central and Eastern Kazakhstan: Tortmola, Shintuzsky, Tortmola, Ak-mola, Nausha, Kenkous, Altyn-Shokysu, Kumsuat, Kintykche, Ashutas, etc. [Popova at all 2018, 2019, Nigmatova, 1998].

In the palynospectra of the Eocene-Oligocene deposits of the Takysor, Shintuzsay, Nausha, Erzhilansai sites (Turgai trough, Aquitanian), pollen grains of chenopods, amaranthaceae, wormwood, cereals and ephedra were found in small quantities (Abuzyarova, 1954, oral communication by Nigmatova S.A.), which also suggests that small steppe areas could have existed on the watersheds even in the Paleogene, which in the late Miocene, due to aridization, significantly expanded the area, displacing moisture- and heat-loving species.

5.3. Fauna analysis

The entire complex of widespread hipparion fauna has been established at the «Goose Passage» site. This fauna is special by the presence of sea pinnipeds *Semantormacrurus* [37-39] and turtles *Chelodoniidae* [33]. This is explained by the fact that the ancestral Irtysh river in the Miocene may have been connected to the sea.

By composition, the vast majority of large mammals are inhabitants of forest-steppe areas: giraffes *Samotherium irtysense* [18], *Sivatherium* sp., *Palaeotragus asiaticus* [18-19]; deer *Cervavitus orlov* Flerov, 1950, *Tragocerus irtysense*, *T. frolovi*, [1]; gazelles *Gazelladorcadoides* Schlosser (Dmitrieva, 1974), *G. deperdita*, *Procacpreolus* sp.; mastodons *Mastodon* sp. [37-39] and inhabitants of coastal areas the rhinoceroses *Chilotherium orlovi* (Baishashov, 1993). Steppe forms are represented by long-legged hipparions *Hipparion longipes* [20, 22] classifies the hipparion *H. elegans* as an inhabitant of forest-steppe areas. Carnivores are represented by the typical companions of the hipparion fauna: hyenas *Hyaenictitherium venator*, *Ictitherium hipparionum*, *I. robustum*, *Crocotaeximia*; *Machairodus irtyschensis* the saber-toothed tiger, mustelids *Plesiogulo* cf. *crassa* Teilhard, *Martes paleosinensis* Zdansky. Collections of institutes in different countries contain fragmented materials, which prevents from accurate counting of specimen and bones of large vertebrates. Only collections of the Institute of Zoology at the RK MES preserve more than a thousand samples of bone remains.

Among small vertebrates, amphibians and rodents predominate. All previously known fragments of toad bones from this site, according to N.V. [21], belong to one species, Mongolian *Bufo raddei*. Out of this, K.I. Iskakova defined lizards, snakes, and frogs; G.D. Hisarova identified fish *Li-*

ciopterca sp., *Perca* sp.; freshwater turtles *Sakya* sp. [48]; and birds *Struthiochersonensis*, *Sushkina pliocaena* [45].

By species, P.F. Savinova 1959, 1960 and 1976 (1988) and L.A. Tyutkova (2003, 2005), established the presence of the following rodents: *Clirinae* gen.?, *Ruscinomyia* gen.?, *Microscoptes praetermissus* Schaub, 1934, *Spermophilus* cf. *orientalis* Qiu, 1991, *Sinocricetus zdanskyi* Schaub, 1930, *Nannocricetus mongolicus* Schaub, 1934, *Sicista bagajevi* Savinov, 1970, *Lophocricetus vinogradovi* Savinov, 1970, *L. afanasievi* Savinov, 1970, *Paralactaga* (= *Proalactaga*) *varians* Savinov, 1970, *Brachiscirtetes robustus* Savinov, 1970, *Scirotodipus kazakhstanica* Savinov, 1970, *S. kalbica* Savinov, 1970, *Rhinocromys savinovi* Tyutkova, 2005. Lagomorphs *Proochoton* cf. *eximia* Chomenko, 1914.

The species composition of small mammals also indicates the forest-steppe landscape of the region. Some of them: shrews *Similisorex orlovi*, *Crociodura pavlodarica*, possibly hamster-like animals *Microscoptes sibiricus*, etc. are inhabitants of river floodplains. There are also forest inhabitants: squirrels *Eutamias* sp., *Myoxinae* gen. indet. According to [44], the composition of the goosepassagean microtherio-complex is dominated by hamsteriformes (54%), followed by jerboas *Lophocricetus* (14.5%), *Proalactaga* (8.5%), *Scirotodipus* (7.3%). Modern creepers and jerboas of Kazakhstan mainly inhabit steppe areas, but in the past, their ancestors could well have lived in the forest-steppe zone.

Table 1. The systematic composition of the hipparion fauna at the «Goose Passage» site

Class	Subclass	Order	Suborder	Family	Subfamily	Genus	Species	Habitat
OSTEICHTHYES (bony fish)	ACTINOPTERYGII (ray-finned)	PERCIDA (perciformes)	PERCOIDEI (perciformes)	Percidae Bonaparte, 1831		Perca Linnaeus, 1758	Perca sp.	Water
AMPHIBIA (amphibians)		ANURA (tail-less)	PROCOELA (procoelous)	Bufonidae Fitzinger, 1826		Bufo Laurenti, 1768	Buforaddei Strauch, 1876	Amphibious
			OPISTHOCELA (opisthocelous)	Bombinatoridae Fitzinger, 1826				
				Bombinatoridae gen. indet.				
				Pelobatidae Bruch, 1861				
				Pelobatidae gen. indet.				
			DIPLASIOCELA (diplasiocoelae)	Ranidae Linnaeus, 1758				
				Ranidae gen. indet.				
REPTILIA (reptiles)	TESTUDINATA (testudinata)	CHELONIA (sea turtles)		Platysternidae Gray, 1870		Sakya Bogachev, 1960	Sakua sp.	Water
	LEPIDOSAURIA (scaly)	LACERTILIA (lizards)	SCINCOMORPHA	Lacertidae Fitzinger, 1826				
				Lacertidae gen. indet.				
			IGUANIA (iguaniiformes)	Agamidae Gray, 1827				
				Agamidae gen. indet.				
		OPHIDIA (snakes)	Colubroidea fam. indet.					
AVES (birds)		STRUTHIONIFORMES SLATHAM, 1790 (ostriches)		Struthionidae Vicords, 1825		Stuthio Linnaeus, 1758	Struthio sp.	
		ACCIPITRIFORMES SAVIGNY, 1809 (diurnal predators)		Falconidae Anonymou, 1820		Sushkinia Tugarinov, 1935	Sushkinia pliocaena Tugarinov, 1935	Forest-steppe

		GALLIFORMES TEMMINCK, 1820 (chicken)		Gallidae Illiger, 1811		Palaeoperdix Milne-Edwards, 1871	Palaeoperdix sp.	
		RALLIFORMES REICHENBACH, 1849 (rails)	GRUES BONAPARTE, 1854 (cranes)	Ergilornithidae Kozlova, 1960		Amphipergus Lydekker, 1891	Amphipergus sp.	
		PASSERIFORMES LINNAEUS, 1758 (passerines)		Motacillidae Vigors, 1825		Anthus Bechstein, 1805	Anthus seductus , Kurochkin, 1985	
							Anthus sp.	
				Emberizidae gen. indet.				
				Alaudidae gen. indet.				
MAMMALIA (mammals)		INSECTIVORA BOWDICH, 1821 (insectivore)		Soricidae Fischer von Waldheim, 1817		Similisorex	Similisorex orlovi, Stogov et Savinov, 1965	Forest-steppe
				Crocidae Stirton, 1930		Crocidae Wagner, 1832	Crocidae pavlodarica Stogov et Savinov, 1965	
				Erinaceidae Fischer von Waldheim, 1817		Schizogalerix Engesser, 1980	Schizogalerix sp.	
		RODENTIA BOWDICH, 1812 (rodents)		Cricetidae Fischer von Waldheim, 1817	Microtinae Cope, 1891	Microtus schaubi Schaub, 1934	Microtus schaubi Schaub, 1934	Forest-steppe
				Sciuridae Gray, 1821	Xerinae Osborn, 1910	Spermophilus brandti, 1852	Spermophilus cf. Orientalis Qiu, 1991	Forest-steppe
					Marmotinae Pocock, 1923	Tamias Illiger, 1811	Tamias (Eutamias) sp.	
				Gliridae Thomas, 1807	Glirinae (=Mioxinae) Thomas, 1807			
					Glirinae gen. indet.			
				Dipodidae Waterhouse, 1842	Sminthinae Murray, 1866	Sicista Gray, 1827	Sicista bagajevi Savinov, 1970	Forest-steppe
					Lophocricetinae Savinov, 1970	Lophocricetus schlosseri, 1924	Lophocricetus vinogradovi Savinov, 1970	Forest-steppe
							Lophocricetus afanasiievi Savinov, 1970	Forest-steppe
					Allactaginae Vinogradov, 1925	Paralactaga Young, 1927	Paralactaga (=Proalactaga) varians (Savinov, 1970)	Forest-steppe
						Brachiscirtetes Schaub, 1934	Brachiscirtetes robustus Savinov, 1970	Forest-steppe
					Dipodinae Vinogradov, 1925	Scirtodipus Savinov, 1970	Scirtodipus kazakhstanica Savinov, 1970	Forest-steppe

							Scirtodipus kalbica Savinov, 1970	Forest- steppe
				Tachyo- ryctoididae Schaub, 1958		Rhinoce- romys Tyutkova, 2005	Rhinocero- mys savinovi, Ty utkova, 2005	Forest- steppe
		LAGOMORPHA BRANDT, 1855 (Lagomorpha)		Lagomyidae Lilljeberg, 1866	Lagomyin- aeLilljeberg, 1866	Proochoto- na Khomen- ko, 1914	Proo- chotonac.f. Eximia Chomenko, 1914	Forest- steppe
		CARNIVORA BOWDICH, 1821 (carnivores)	FISSIPEDIA BLUMENBACH , 1791 (true carnivores)	Mustelidae Swainson, 1835	MustelinaeGill, 1872	Martes Frisch, 1775	Martes paleosinen- sis Zdansky, 1925 ?	Forest- steppe
						Plesiogula Zdansky, 1924	Plesiogula cf. Crassa Teilh. De Chard., 1945	Forest- steppe
				Hyaenidae Gray, 1869	HyaeninaeMi- vart, 1882	Crocuta Kaup, 1828	Crocuta (=Percrocut a) eximia Roth et Wagn., 1855	Forest- steppe
					Ictitheriinae- Touessart, 1897	Ictitherium Wagner, 1848	Ictitherium hipparionum Gervais 1846	Forest- steppe
							Ictitherium robustum Gervais, 1850	Forest- steppe
						Hyaenic- titherium	Hyaenic- titherium venator	Forest- steppe
				Felidae Gray, 1821	Machairodon- tinaeGill, 1872	Machairo- dus Kaup, 1883	Machairo- dus ir- tyshensis Orlov, 1936	Forest- steppe
		PERISSODACTYLA OWEN, 1848 (peris- sodactyls)	HIPPOMORPHA WOOD, 1937	Equidae Gray, 1821		Hipparion de Chris- tol, 1832	Hipparion longipes Gromova, 1952	Steppe
							Hipparion elegans Gromova, 1952	Forest- steppe
		CERATOMORPHA WOOD, 1937		Rhinoce- rotidae Owen, 1845	Acera- theriinaeDoll, 1885	Chilotheri- um Ring- strom, 1924	Chilotheri- um orlovi (=schlosseri) Bayshash- ov, 1982	Forest- steppe
					Rhinoceroti- naeOwen, 1845	Sinotheri- um Rhig- strom, 1922	Sinotherium sp.	
		ARTIODACTYLA OWEN, 1848 (artio- dactyls)	RUMINANTIAS COPOLI, 1777 (ruminants)	Cervidae Gray, 1821	CervinaeBaird, 1857	Cervavitus Flerov, 1950	Cervavitus orlovi Flerov, 1950	Forest- steppe
					Obo- coileinaePococ, 1923	Procapreo- lus Schlosser, 1924	Procapreo- lus sp.	Forest- steppe
				Girafidae Gray, 1821	Palaeotragi- naePilgrim, 1911	Palaeotrag- us Gaudry, 1861	Palaeotragus asiaticus Godina, 1975 ?	Forest- steppe
						Samotheri- um F. Major, 1888	Samotheri- um ir- tyshense Godina, 1962	Forest- steppe

					Sivatheriinae Zittel, 1893	Sivatherium Falconer et Cautley, 1835	Sivatherium sp.	Forest-steppe
				Bovidae Gray, 1821	Bovinae Gill, 1872	Tragocerus Gaudry, 1861	Tragocerus irtyschense Abdrachmanova, 1974	Forest-steppe
							Tragocerus frolovi M. Pavlova, 1913	
						Miotragocerus Stromer, 1928	Miotragocerus cf. pannoniae, Kretzoi, 1941	
					Antilopinae Baird, 1857	Gazella Blainville, 1816	Gazella dorcadoides Schlosser, 1903	Forest-steppe
							Gazella deperdita Gervais, 1848	
					Hippotraginae Brooke, 1876			
					Hippotraginae gen. indet.			
		PROBOSCIDEA ILLIGER, 1811 (proboscidian)	ELEPHANTOID EA OSBORN, 1921	Mastodontidae Girard, 1852		Mastodon G. Cuvier, 1806	Mastodon sp.	Forest-steppe
		PINNIPEDIA (pinnipeds)		Semantoridae Orlov, 1931		Semantor Orlov, 1931	Semantor marcurus Orlov, 1931	Marine water

In regard to species, about 60% of the vertebrate fauna of the «Goose Passage» relate to the forest-steppe zone, 17% to aquatic and amphibians, 9% to the steppe, 8% to inhabitants of coastal areas, 6% to inhabitants of forests.

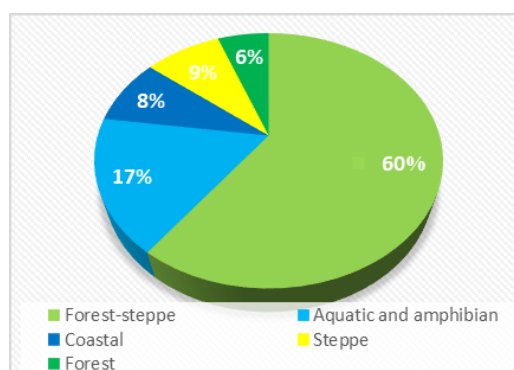


Figure 9. Ratios of major species by ecological habitat zones

Hipparions are one of the forms of horses, linking small Eocene inhabitants of wetland forests (with four toes on the forelimbs and three toes on the hind limbs (*Hyracotherium*)) to modern steppes, single-toed forms (*Equus*. Hipparions); they lived during the second half of the Miocene to the second half of the Pliocene, when a change happened in landscapes from warm-temperate forest zones to arid forest-steppe and steppe zones. [20] divides hipparions into two ecological types: one lived in a more forested landscape with moist soil, soft and succulent vegetation, and the other lived under more xerophilic conditions.

The second most numerous vertebrates after Hipparion at the «Goose Passage» are Rhinoceros Chiloteria. Accounting for known distinctive features of the Chinese *Chilotherium umanderssoni* and the Ukrainian Grebeniki and Berislava *Chilotherium schlosseri*, *Ch. sarmaticum*, this species of rhinoceros was described as *Chilotherium orlovi* [5], named so after the discoverer of this site, Yu.A. Orlov.

Ringstrom T. [42], describing rhinoceroses of the genus *Chilotherium*, considered them to be inhabitants of steppe biotopes, pointing to development of hypsodont teeth, the position of incisors in the lower jaw and the elongation of middle fingers relative to the lateral ones. According to E.I. Belyaeva [15], *Chilotherium*, like other short-legged rhinoceroses, lived in low-lying, wet and swampy places. V.I. Gromova (Gromova 1954) noted some features of convergence in the structure of limbs of *chilotheriums* and swamp rhinoceroses (wide shoulder blade, shortened limbs, widened and inactive hands and feet, etc.). E.L. Korotkevich (1970) allowed the existence of some later forms in steppe zones, and Sarmatian *chilotherium*, in her opinion, lived in coastal wooded-swampy biotopes. Hypsodontism of their teeth could have developed due to the grinding of hard marsh vegetation.

B.U. Baishashov, based on structural features of the skeleton of *Ch. Orlovi* believes that they lived in low-lying, coastal areas with abundant vegetation and, apparently, spent most of their time in shallow bodies of water. Perhaps this, to some extent, served as their protection from predators. Being in low, swampy places or water bodies, *Chilotherium* fed on abundant coastal plants and therefore did not need to tilt its head down much. Short limbs also contributed to this.

By size and some signs of evolutionary development, all chilotheria can be divided into groups:

- the small form (*Ch. sarmaticum*) - with weakly molarized, relatively narrow high teeth, less adapted to coastal areas, known from Sarmatian deposits of the Berislav site in Ukraine;
- the middle form (*Ch. anderssoni* and *Ch. schlosseri*) with well-molarized front molars, adapted to living in coastal areas, known from the Maeotic deposits of the Shanxi site of China and the Maeotic deposits of south-eastern Europe;
- the large form (*Ch. orlovi*) with relatively wide, more molarized front molars, with a long and wide symphysis, more adapted to the coastal, aquatic habitats, from Pavlodar.



Figure 10. The skeleton of a hipparion in the paleontological museum of Almaty



Figure 11. The skeleton of a chyloterium rhinoceros (*Ch. orlovi*) in the paleontological museum of Almaty

Another group of Pavlodar rhinoceros, *Sinoitherium* (Ringstrom, 1922), is poorly studied, because their remains are extremely rare. These rhinoceroses were the ancestors of steppe Elasmotheriums, probably still in the stage of transition from wet forest-steppe to steppe biotopes. They were first described in China, from the Maeotic site of Shanxi. So far, only minor fragments of bones of the post-cranial skeleton have been found in the «Goose Passage». Much better material in the form of a fragment of the skull and some bones of the limbs was discovered in Kazakhstan from the deposits of the Karabulak Suite of the Zaisan depression, Kalmakpai site [6, 9], which belongs to another, later species.

Analysis of the data shows that the classic hipparion fauna of Pavlodar, reflecting the heyday of its biodevelopment and distribution, belongs to the upper part of the MN 12 biozone and the beginning of the MN 13 biozone. It should be noted that according to V.S. Zazhigin et al. (2002), «Goose Passage» rodents show an age of MN 12.

The Pavlodar fauna correlates with the Kalmakpai fauna (Karabulak Suite) at the Kalmakpai site (Eastern Kazakhstan, Lake Zaisan). However, the Kalmakpai fauna (Karabulak) is younger than that of Pavlodar. The fauna of the Karabulak Suite with a late Hipparine faunal complex belongs to the end of the MN 13 biozone and the first half of the MN 14 biozone.

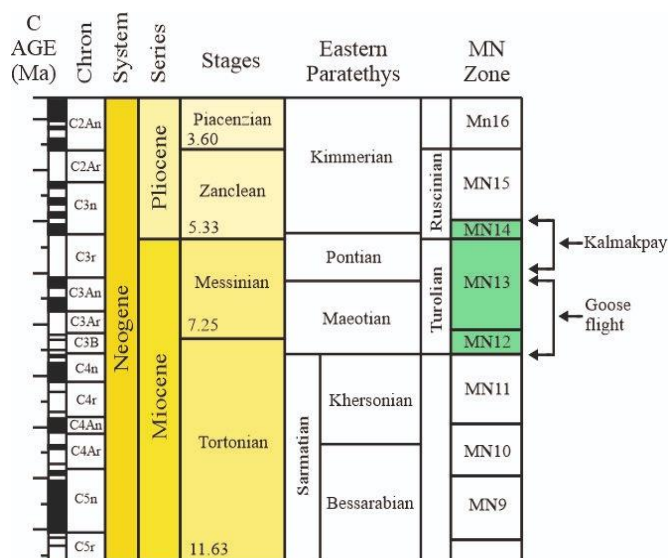


Figure 12. Stratigraphic distribution of the hipparion fauna at «Goose Passage» and Kalmakpai sites

The probable gap in absolute age between these two deposits of hipparion faunas is 1–1.5 million years.

Thus, analysis of data on the oryctocenosis of the hipparion fauna of the «Goose Passage» site shows that at the end of the Miocene this territory had a vast forest-steppe zone, rich in vegetation, with lake-river sites.

4. Conclusions

The Miocene (23.0–5.3 million years) marked the last period of warm climate at the planetary level. The warm climate and abundance of precipitation on the territory of Eurasia in the Lower-Middle Miocene favoured development of forests, extremely diverse and rich in taxonomic composition (Popova at all 2018, Florent Rivals at all, 2024, N. V. Zelenkov et al., 2022), with domination of deciduous trees: various types of walnut, elm and beech; evergreen plants (myrtle, laurel, magnolia), lianas were widespread, and preserved among conifers were taxodiaceae (Kornilova, 1966, Nigmatova, 1998). Such flora is known in the literature as the warm-temperate flora of the Turgai ecological type. The Late Oligocene-Early Miocene was characterized by the development of the indricotherium (Turgai) fauna. It was studied for the first time in the territory of the Turgai trough by A.A. Borisyak (1915), who described the hornless rhinoceros *Indricotherium* from this area, typical of the Turgai fauna. One of the main elements of the Turgai fauna were odd-toed ungulates, chalicotherium, some rodents, and predators; among artiodactyls, the pig-like *Entelodon*, *Anthracotherium*, swamp (aminodont) rhinoceroses, as well as tapiroids. In addition, the indricotherium fauna included insectivores, predators, ancient lagomorphs, rodents and others. Among the artiodactyls there were representatives of Cetancodontamorpha (*anthracotherium* and *entelodons*), as well as primi-

tive ruminants - short-legged (*Lophiomeryx*) and long-legged (*Prodremotherium*) deer. In addition to mammals, the Turgai fauna included birds, turtles, fish, insects and mollusks. The vast space inhabited by this fauna was heterogeneous in composition.

Later, the warm-temperate flora of the Turgai ecological type gave way to the more xerophytic, «Mediterranean», flora of the Kushuk site [Kornilova, 1964], with predominance of narrow-leaved forms. As noted by V.S. Kornilova, flowering plants, with few exceptions, are represented by deciduous small-leaved forms, modern analogues of which now live in Western Asia and the Mediterranean.

In the early Miocene, a radical restructuring of the mammal fauna occurred. Within the Turgai trough, the so-called gomphotherian fauna developed, its remains were first collected in the Kushuk site. This is so far the only site characterized by rhinoceroses - *Aceratherium depereti* Boriss., *Brachiopoterium aurelianense* var. *gailiti* Boriss., in addition, the earliest large proboscideans for Eurasia were established here: mastodons *Mastodonatavus* Boriss., *serridentinus* Boriss. et Bel.

In the late Miocene (~10–9 million years ago), the zone of continuous forests was divided into separate massifs, gradually decreasing in size. Forest broad-leaved vegetation gradually retreated from the plains to mountainous areas, and into the wide valleys of numerous rivers, losing the most vulnerable heat-loving elements. In the central and western parts of the territory, lakes (often salty) and quickly drying oxbow lakes were preserved, facilitating the survival of remains of the flora and fauna.

In the open spaces between river valleys, sparse woods were replaced by dry savannas.

In the temperate latitudes of continental Eurasia in the late Miocene, due to the degradation of broad-leaved woods, steppe associations formed with wormwood-grass vegetation. In Central Europe, in the south of Eastern Europe, in Kazakhstan, Mongolia, began the «process of great steppeization» [34], the reason for this was the neotectonic activation of the earth's crust at the Paleogene-Neogene boundary (23 million years ago), «expressed in the general uplift of the continent and the formation of modern mountain systems. The consequence of these processes is a powerful regression of the Paleogene epicontinental seas, orographic isolation and a sharp increase in the continental climate of the interior regions of Eurasia» [1]. At the same time, the forest-steppe zone became isolated as a transitional type. As aridization intensified, semi-deserts and deserts with saxaul, ephedra, etc. appeared in temperate latitudes.

The diversity of landscapes has contributed to the emergence of different ecological niches for herbivores and predatory mammals.

In the second half of the Miocene, valley and lowland forests transformed from subtropical swamps into broad-leaved forests. At the same time, in the interfluvial spaces, open forest gives way to savanna-steppe, first meadow and then dry. Landscapes are becoming increasingly open, with grassy cover, which favors the existence of ungulates. In the forest-steppes and steppes of Eurasia, the anchitherium fauna (genus *Anchitherium* - a small horse with three-toed limbs) developed, which has ecological differences in the arid and humid regions of Eurasia. In addition, this included a variety of rhinoceroses, mastodons, tragulids, muntjac deer, pig-like

animals, gazelles, large chalicotheriids, rodents, and turtles (Bazhanov, 1955).

In Central Kazakhstan, Mongolia, and China, it included a variety of forest and forest-steppe animals: muntjac deer, mastodons, gazelles and rodents, which enabled V.S. Bazhanov to identify a more xerophilous variant of the anchitherium fauna into a special «muntjac complex» that lived in a forest-steppe landscape [16].

In Kazakhstan, remains of vertebrate anchitherium fauna are known in Torgai, Central Kazakhstan, North-Eastern Ustyurt on the coast of the Aral Sea, in the Pavlodar Irtysh region, in the Zaisan depression.

The direct trans-Mediterranean contact between Europe and Africa, which appeared in the mid-Miocene, facilitated widespread animal migration. From Africa come elephants, mastodons, giraffes, hippos, and hyenas. The emergence of open landscapes in Beringia, until that time exclusively forested, determines the wide migration routes of the steppe fauna of Asia and America. From America come herbivorous (that is, not leaf-eating) horses, felines, and canine predators, and from Asia - bulls and antelopes.

Communities of forest mammals of the anchitherian fauna were gradually replaced by animals adapted to life in open spaces. It also contains giraffes, rhinoceroses, mastodons, deer, antelopes, gazelles, ostriches, numerous rodents and true predators: saber-toothed tigers (mahairoids), bears, hyenas, etc. By the end of the Tortonian age (~7.2 million years ago), on the territory of Central Kazakhstan, an ecosystem is being formed that is most similar to the ecosystem of the modern African savanna.

In the late Miocene and early Pliocene, the next phase of rapid cooling and continentalization of the climate begins. Geobotanical zoning becomes even more contrasting and complex. At the end of the Miocene, due to the onset of a drier climate, almost universal development of steppe vegetation is observed; vast spaces covered in the Paleogene and in the first half of the Neogene by subtropical forests take on the character of steppes and forest-steppes, the area of the latter also increases and due to the increase in land mass due to the partial liberation of continents from the seas that covered them.

Due to the general advance of the steppe into forests, the living conditions of some of its inhabitants are deteriorating, some of whom are dying out, others are migrating, following the remnants of forest flora in river valleys and into the mountains. At the same time, thanks to the strong development of herbaceous vegetation, the ungulate fauna that inhabited the steppes and forest-steppes quickly flourishes and widely spreads, and the hipparion fauna starts to blossom.

The largest sites of hipparion fauna amaze with the accumulation of some animals: giraffes, rhinoceroses, hipparions. In Kazakhstan, such sites include, in addition to «Goose Passage», the Tulkisai ravine in Torgai near the city of Arkalyk, the Kalmakpai mountains in the Zaisan region, on the shore of Lake Karabastuz in the Semipalatinsk's Irtysh region, in the Almaty region near the village of Saty (the Bota-Moinak pass) and in the Esekartkan ravine in the Tekes depression. However, in regard to number of species and abundance of bone remains, the fauna of «Goose Passage» is the most representative.

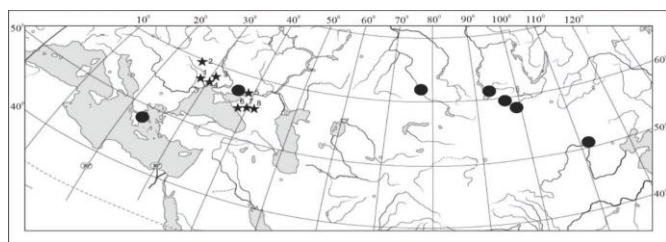


Figure 13. The diagram of the distribution of the hipparion fauna sites in Eurasia

The climate of the late Pliocene had, preserved to this day, the characteristic features of a continental climate, which was determined by the position of Kazakhstan within the Eurasian continent.

In most of the territory of modern Kazakhstan, a mild monsoon climate developed and there were open, mostly flat, shallow-hill spaces with the participation of cereals in the northern part (savanna type), with deciduous forests of elm, poplar, willow, linden, walnut, and oak in the floodplains of numerous rivers and with the dominance in the southern part and on the watersheds of wormwood, goosefoot, cereals, fruit and nut groves in the river valleys [3]. Only in the very south did low mountains rise, covered with pine and spruce trees and fruit forests in the foothills.

The open savannah spaces were inhabited by the Auvergne mastodon, the southern forest elephant, Stenon's one-toed horse (later the Sanmien horse), gazelles, goitered gazelles, giant camels and Prebactrian camels, as well as ostriches of the genus *Struthio*. The wooded interfluvies were inhabited by the southern elephant (the Ili faunal complex, analogous to the Khaprovsky one) [17].

Thus, the study of the hipparion fauna of the «Goose Migration» allows reconstructing the development of forest-steppe and steppe landscapes of the temperate zone, complementing the holistic picture of the development of the arid climate of Eurasia. This is an important geological and paleontological site, comparable to such well-known sites of hipparion fauna as Taralyk-Cher and Kholu (Russia, Tuva), the Baode fauna in Shanxi Province in China, Grebeniki and Berislavsky in Ukraine, Chobruchi, Tudorovo, Taraclia in Moldova [27, 28, 49].

Acknowledgements

The article was delivered as part of the grant project AR 14871967 «Geological-paleontological and paleoclimatic studies of Cenozoic deposits of Central Kazakhstan as a basis for predicting mineral deposits» of the Ministry of Science and Higher Education of the Republic of Kazakhstan (RK MES).

References

- [1] Abdurkhanova L.T. Paleogene and Neogene ruminants on the territory of Kazakhstan // Author's abstract. Cand. dissertation. – 1973. – 12 p.
- [2] Aubekero B.Z. On the changes in the paleogeographic situation of Kazakhstan during the last climatic rhythm "Development of the nature of the USSR territory in the late Pleistocene and Holocene." - Moscow: Nauka - 1982
- [3] Aubekero B.Z., Nigmatova S.A. Continental Quaternary deposits of Kazakhstan // Geology of Kazakhstan, reports to the 32nd Geological Congress. Almaty, 2004. P. 26–35.

- [4] A.A. Abdullin, M.A. Abdulkabirova, M.A. Kasymov et al.; eds.: M.A. Abdulkabirova (chief ed.) et al.; USSR Academy of Sciences, K.I. Satpaev Institute of Geological Sciences [et al.]. - Alma-Ata: Nauka Kazakh SSR, 1987. - 221,[1] p., [3] l. il.: il. / Geology of Northern Kazakhstan: (stratigraphy)
- [5] Bayshashov B.U. A new species of the genus *Chlotherium* rhinoceros from Pavlodar // Materials on the history of fauna and flora of Kazakhstan. 1982. Vol. 8. P. 72-83.
- [6] Bayshashov B.U. A new species of *Sinotherium* from the Pliocene of Kazakhstan // Paleontological Journal. – 1986. – No. 4. – P. 83-88.
- [7] Bayshashov B.U. Neogene rhinoceroses of Kazakhstan. Almaty. – 1993. – 194 p.
- [8] Bayshashov B.U., Akhmetov K.K., Aliysova V.N. Paleontological natural monument "Goose Migration" - classic burial of hipparion fauna // "Selevinia" Almaty. 2003. P. 182-185.
- [9] Bayshashov B.U. Features of rhinoceroses "Goose Migration" and their biostratigraphic characteristics // Materials of the International Scientific and Practical Conference "Paleontological Monuments of Nature - Natural Heritage: Study, Research Perspectives, and Conservation Issues" Pavlodar. – 2008. – P. 49-51.
- [10] Bayshashov B.U., Nigmatova S.A., Aliysova V.N., Imankulova R.B. On the issues of paleoecological situation of the hipparion fauna of the "Goose Migration" location in the Pavlodar Pre-Irtysh region // Materials of the International Scientific and Practical Conference "Current Problems of Natural Science Knowledge" dedicated to the 90th anniversary of the discovery of the natural monument "Goose Migration". Pavlodar. 2018. P. 526-533.
- [11] Bayshashov B.U., Aliysova V.N. Biostratigraphic position of the hipparion fauna of "Goose Migration" Pavlodar and Kalmakpai Zaysan depression // Zoological and parasitological research in Kazakhstan and neighboring countries. Almaty. 2018. P. 171-174.
- [12] Bayshashov B.U. and Spenser G. Lucas. The fifth digit of *Aprodon* (*Rhinocerotidae*) from the Miocene Kalkaman locality, Kazakhstan/Mexico Museum of Natural History and Science Bulletin 67, pp.131 – 133.
- [13] Borissiak, A.A. On the lower jaw of a small rhinoceros from the Indricotherium beds of the Turgai region. - n.p., 1921. - P. 39-44. - Separate copy.
- [14] Bayshashov B.U., Kazenas V.L. Geological history and faunogenesis of Kazakhstan and adjacent territories in the epochs of mammalian and anthophilous insect development. Almaty, 1999, 42 p.
- [15] Belyaeva E.I. New materials on Tertiary rhinoceros-like creatures of Kazakhstan // Proceedings of the Paleontological Institute. 1954. Vol. 47. P. 24-54.
- [16] Bazhanov V.S. Overview of the history of terrestrial vertebrate fauna of Kazakhstan. Materials on the history of fauna and flora of Kazakhstan, vol. 1. Alma-Ata, Publishing House of the Academy of Sciences of the Kazakh SSR, 1955.
- [17] Bazhanov V.S., Kostenko N.N. Atlas of guiding forms of anthropogenic mammals of Kazakhstan. Alma-Ata. - 1962. - 111 p.
- [18] Godina A.Y. A new species of *Samotherium* from Kazakhstan // Paleontological Journal. – 1962. – No. 1. – P. 131-139.
- [19] Godina A.Y. Historical development of the giraffe (genus *Palaeotragus*) Moscow. –1979. – 116 p.
- [20] Gromova V. Hipparions (genus *Hipparion*). Proceedings of the Paleontological Institute of the USSR Academy of Sciences. 1952. Vol. 36. 177 p.
- [21] Gutieva-Chkareuli N.V. Remains of the Mongolian frog from the Pavlodar Pre-Irtysh region // Zoological research in Kazakhstan. – 2002. – P. 196-198.
- [22] Zhegallo V.I. Hipparions of Central Asia // Joint Soviet-Mongolian Paleontological Expedition. – 1978. – Iss. 7. – 152 p. <https://doi.org/10.1134/S0031030122020149>

- [23] Zykin V.S., Zazhigin V.S., Prisyazhnyuk V.A. Stratigraphy of the Pliocene of the southern West Siberian Plain // Quaternary of Siberia and Northeast USSR. - Novosibirsk. 1989. P. 9-18.
- [24] Zykin V.S. New data on the section of Neogene deposits near Pavlodar // Problems of Stratigraphy and Paleogeography of the Pleistocene of Siberia. Novosibirsk, 1982, p. 66-72.
- [25] Zykin V.S. Climate change in the late Miocene and Pliocene in the south of the West Siberian Plain // Evolution of climate, biota, and human habitat in the late Cenozoic of Siberia. Novosibirsk, Institute of Geology and Geophysics SB RAS, 1991, p. 5-17.
- [26] Zazhigin V.S., Lopatin A.V., Pokatilov A.G. The history of Dipodoidea (Rodentia, Mammalia) in the Miocene of Asia. 5. Lophocricetus (Lophocricetinae) // Paleontological Journal. 2002. No. 2. P. 62-75.
- [27] Zelenkov N.V., Syromyatnikova E.V., Tarasenko K.K., Titov V.V., Tesakov A.S. Southeast Europe as an arena for vertebrate evolution in the late Miocene Paleontological Journal, 2022, No. 2, pp. 93-108
- [28] Lavrov A.V., Zabelin V.I. New pages of preglacial history of Southern Siberia. Dark games of the universe, vol. 25, No.1. 2009
- [29] Lavrov V.V. Continental Paleogene and Neogene of the Aral-Siberian Plains. Alma-Ata. 1959. 231 p.
- [30] Kornilova V.S. Lower Miocene Flora of Kushuk. Alma-Ata. 1960. 170 p.
- [31] Kornilova V.S. Essays on the History of Flora and Vegetation of Kazakhstan. Vegetation Cover of Kazakhstan. Alma-Ata. 1966. Vol. 1. pp. 37-69.
- [32] Korotkevich E.L. Mammals of the Late Sarmatian Hipparion Fauna of Berislav. Natural Environment and Fauna of the Past. Kyiv. 1970. Issue 5. pp. 14-121.
- [33] Kuznetsov V.V. Sea Turtle from the Neogene of the Pavlodar-Irtysh Region. Materials on the History of Fauna and Flora of Kazakhstan. 1958. Vol. 2. pp. 69-71.
- [34] Nikolaev V.A. Landscapes of Asian Steppes. Moscow: Moscow State University Publishing. 1999. 288 p.
- [35] Orlov Yu.A. New Finds of Fossil Mammals in Siberia. Nature. 1929. No. 9. pp. 826-829.
- [36] Orlov Yu.A. Excavations of the Hipparion Fauna on the Irtysh River. Nature. 1930. No. 1. pp. 47-58.
- [37] Orlov Yu.A. Fauna of Pavlodar. Nature. 1939a. No. 4. pp. 64-67.
- [38] Orlov Yu.A. Some Data on the Structure of the Teeth and Limbs of Ictitherium hipparionum. Reports of the USSR Academy of Sciences. 1939b. Vol. 22. No. 8. pp. 535-537.
- [39] Orlov Yu.A. Some Data on the Structure of the Limbs of Crocuta eximia. Reports of the USSR Academy of Sciences. 1939c. Vol. 22. No. 8. pp. 538-540.
- [40] Popova S.V., Aleksandrova G.N., Golovina L.A., Koiava K.P. Paleocological and Lithological Characteristics of Stratotype Sections of the Lower Miocene of Eastern Paratethys (Kartli Depression, Georgia). Stratigraphy. Geological Correlation. 2022. Vol. 30. No. 5. pp. 75-98. <https://doi.org/10.1134/S0869593822050057>
- [41] Ringstrom T.J. Sinotherium lagrelii, a new fossil rhinocerotid from Shansi. Bulletin of the Geological Survey of China. 1922. No. 5. pp. 91-94.
- [42] Ringstrom T.J. Nahornor of the Hipparion Fauna of Northern China. Palaeontologia Sinica. Series C. 1924. Vol. 1. pp. 91-93.
- [43] Savinov P.F. General Results of Paleobiological Studies of the Pavlodar-Irtysh Region. Theriology. Novosibirsk. 1972. Vol. 1. pp. 131-142.
- [44] Savinov P.F. Succession of Faunal Complexes of Small Mammals in the Neogene of Kazakhstan. Materials on the History of Fauna and Flora of Kazakhstan. 1988. Vol. 10. pp. 20-37.
- [45] Tugarinov A.Ya. Some Data on the Oligocene Avifauna of Siberia. Proceedings of the Paleontological Institute. 1935. Vol. 4. pp. 79-89.
- [46] Tyutkova L.A. Neogene Rodents from the "Goose Flight" Site (Pavlodar, Kazakhstan). Systematics, Phylogeny, and Paleontology of Small Mammals. Saint Petersburg. 2003. pp. 218-220.
- [47] Tyutkova L.A. A New Representative of Rodents from the Neogene of the Pavlodar-Irtysh Region (Goose Flight, Kazakhstan). Proceedings of the Institute of Zoology of the Ministry of Education and Science of the Republic of Kazakhstan. 2005. Vol. 49. pp. 57-63.
- [48] Chkhikvadze V.M. Neogene Turtles of the USSR. Tbilisi. 1989. 102 p.
- [49] Florent Rivals, Ruslan I. Belyaev, Vera B. Basova, Natalya E. Prilepskaya. A tale from the Neogene savanna: Paleocology of the hipparion fauna in the northern Black Sea region during the late Miocene. Palaeogeography, Palaeoclimatology, Palaeoecology. Volume 642. 2024. <https://doi.org/10.1016/j.palaeo.2024.112133>

Орталық Қазақстанның солтүстік-шығыс бөлігіндегі (Қазғұш өткелі аймағы) соңғы неоген дәуірінің палеогеографиялық реконструкциясы

Б.У. Байшашов¹, С.А. Нигматова¹, А.Л. Сейдалы¹, И.Т. Мадиярова^{1*}, Спенсер Лукас²

¹Қ. Сәтбаев атындағы Геологиялық ғылымдар институты, Алматы, Қазақстан

²Табиғи тарих мұражайы, Нью-Мексико, АҚШ

*Корреспонденция үшін автор: ilnura_elya@mail.ru

Андатпа. Орталық Қазақстанның кайнозой дәуіріндегі геологиялық және палеогеографиялық дамуының заңдылықтарын зерттеу мен анықтау Еуразияның геологиялық процестерін түсіну үшін өте маңызды, өйткені бұл процестер Батыс Қазақстан, Орталық Азия және Батыс Сібірдің көршілес аймақтарындағы теңіз және құрлықтық ландшафттарда көрініс тапқан. Кайнозой дәуірінің басынан бастап мұнда шөгінділердің континенттік режимі қалыптасып, денудация жазықтары мен аласа таулы аймақтардың ландшафттары басым болды. Органикалық қалдықтар кайнозой дәуірінің құрлықтық қабаттарын жіктеп, палеоцен мен эоцен кезеңдеріндегі тропикалық және субтропикалық ландшафттардан бастап төрттік дәуірдің басындағы дала және саванна ландшафттарына дейінгі кезеңдердің дамуын қайта қалпына келтіруге мүмкіндік береді. Қазғұш өткелі фаунасы орны – плиоцен кезеңінің Павлодар формациясының стратотипі болып табылады. Ол Орталық Қазақстанның солтүстік-шығыс бөлігінде, Ертіс өзенінде, Павлодар қаласының аумағында орналасқан Еуразиядағы миоцен кезеңінің гиппарион фаунасының ең ірі орындарының бірі.

«Қазғұш өткелі» орны Ресейдің Тува аймағындағы Таралық-Чер және Холу, Қытайдың Шаньси провинциясындағы Баодэ фаунасы, Украинаның Гребеники және Бериславский, сондай-ақ Молдованың Тараклия сияқты кеңінен танымал гиппарион фаунасы орындарымен салыстыруға болады. Бұл орын қорғауды қажет етеді, өйткені ол Ертіс өзенінің жағалауының эрозиясы және бақылаусыз үлгі жинау салдарынан бұзылуда. Мақалада Павлодар формациясы шөгінділерінің сипаттамасы, олардың геологиялық және палинологиялық ерекшеліктері, сондай-ақ Қазғұш өткелі орнын зерттеу тарихы, қазба қалдықтарының ең толық тізімі, олардың экологиялық сипаттамалары беріледі және Павлодар формациясы қабаттарының жиналу жағдайлары туралы қорытындылар жасалған.

Негізгі сөздер: гиппариондық фауна, Павлодар формациясы, кеш миоцен, палеогеография, Орталық Қазақстан.

Палеогеографическая реконструкция позднего неогена в северо-восточной части Центрального Казахстана (место «Гусиный переход»)

Б.У. Баишашов¹, С.А. Нигматова¹, А.Л. Сейдалы¹, И.Т. Мадиярова^{1*}, Спенсер Лукас²

¹Институт геологических наук имени К. И. Сатпаева, Алматы, Казахстан

²Музей естественной истории, Нью-Мексико, США

*Автор для корреспонденции: ilnura_elya@mail.ru

Аннотация. Изучение и выявление закономерностей геологического и палеогеографического развития Центрального Казахстана в кайнозой имеет фундаментальное значение для понимания геологических процессов Евразии в целом, поскольку они нашли отражение в морских и континентальных ландшафтах прилегающих регионов Западного Казахстана, Центральной Азии и Западной Сибири. Практически с начала кайнозоя здесь установился континентальный режим осадконакопления с ландшафтами денудационных равнин и низких возвышенностей. Органические остатки позволяют расчленить континентальные отложения кайнозоя и реконструировать этапы развития ландшафтов - от типично тропических и субтропических в палеоцене и эоцене до степных и саванных ландшафтов к началу четвертичного периода. Фаунистическая местность «Гусиный перелет» является стратотипом плиоценовой Павлодарской формации. Это одно из крупнейших местонахождений гиппарионовой фауны миоцена Евразии, расположенное в северо-восточной части Центрального Казахстана, на реке Иртыш, в черте города Павлодар. Местность «Гусиный перелет» сопоставима с такими широко известными местонахождениями гиппарионовой фауны, как Таралык-Чер и Холу (Россия, Тыва), фауна Баодэ в провинции Шаньси (Китай), Гребеники и Бериславский (Украина), Тараклия (Молдова). Это местонахождение нуждается в охране, так как разрушается из-за эрозии берегов Иртыша и неконтролируемого отбора образцов. В статье приводятся описание отложений Павлодарской формации, их геологические и палинологические характеристики, а также история изучения местонахождения «Гусиный перелет», наиболее полный перечень фауны, их экологические характеристики и сделаны выводы об условиях накопления отложений Павлодарской формации.

Ключевые слова: гиппарионовая фауна, Павлодарская формация, поздний миоцен, палеогеография, Центральный Казахстан.

Received: 19 June 2024

Accepted: 15 October 2024

Available online: 31 October 2024

Assessment of spectral indices variations in areas with favourable hydromeliorative conditions of the Maktaaral irrigation massif

Zh.A Onglassynov^{1*}, L.V. Shagarova², M.M. Muratova¹

¹U.M. Akhmedsafin Institute of Hydrogeology and Geoecology, Almaty, Kazakhstan

²Institute of Radiophysics and Physical Electronics of the Omsk Scientific Center of the Siberian Branch of the Russian Academy of Sciences, Omsk, Russia

*Corresponding author: zhuldzybek.onlasynov@mail.ru

Abstract. Space technologies, which provide the capability for remote sensing of the Earth, including monitoring of vegetation conditions, are now an integral part of agricultural monitoring. One of the main tools for monitoring studies is the imaging equipment of the Landsat spacecraft. Optical-electronic satellite imaging is performed in different spectral bands. The Landsat series of satellites has a long time series of archived data with a reference accuracy of medium spatial resolution. This paper proposes an integrated approach using remote sensing and GIS techniques to study the influence of hydrogeological conditions of irrigated massifs on crop yields. Landsat-8 space images for the period 2013-2021 were used as remote sensing data to study the influence of soil salinity, groundwater level and salinity on raw cotton yields in the Maktaaral irrigation array plots of Turkestan Province. To assess the influence of these factors, spectral vegetation indices, salinity indices and water indices were calculated and analysed. The index images obtained made it possible to identify differences in raw cotton yields in plots with favourable ameliorative conditions. Using spectral vegetation indices, it was possible to identify zones with the most active cotton growth, as well as areas with low yields, which may be related to soil salinity and insufficient groundwater levels. High soil salinity and high groundwater salinity negatively affect the yield of raw cotton. Thus, the analysis of spectral vegetation indices, salinity indices and water indices makes it possible to determine more precisely the factors affecting crop yields and to take the necessary measures to increase yields in areas with unfavourable conditions. Crime determination aspects in the Far East Federal region are discovered considering socioeconomic situation, complex of negative demographic and socio-economic factors that lead to significant decrease of gainfully employed population and relevance of labor migration. The research objective is to uncover the problems of drug abuse crime in the Far East Federal Region. Objectives: to study and analyze the statistics of demographic and migration processes in this region, to show the consequences of violating migration rules, their impact on increasing the rate of drug abuse crime.

Keywords: Maktaaral irrigation array, hydromeliorative conditions, remote sensing data, GIS-technologies, cotton, index images, vegetation indices, water indices, salinity index.

1. Введение

Исследование гидрогеологических условий орошаемых массивов с использованием методов дистанционного зондирования Земли (ДЗЗ) в Мактааральском массиве орошения является весьма актуальным.

Мактааральский массив Туркестанской области объектом исследования выбран как основной хлопкосеющий регион Южного Казахстана. Хлопок является одной из важнейших сельскохозяйственных культур, широко используется в текстильной промышленности. Урожайность хлопка напрямую зависит от качества почвы, уровня и минерализации грунтовых вод, а также других факторов, которые могут оказывать влияние на рост и развитие растений. В связи с этим, важно проводить мониторинг и анализ основных параметров, чтобы оценить и прогнозировать урожайность хлопка [1].

Природно-климатические и хозяйственные условия Мактааральского массива, отличающиеся обилием солнечного света, тепла и высоким потенциальным плодородием

почв, создают благоприятные условия для выращивания таких важных сельскохозяйственных культур, как хлопчатник, овощные и бахчевые культуры. Однако эти преимущества теряют свою значимость, когда дефицит влаги в корнеобитаемом слое восполняется за счет орошения, что приводит к подъему уровня грунтовых вод и засолению почв. В результате ухудшается качество орошаемых земель и снижается урожайность. Даже при слабом уровне засоления потери урожая достигают двадцати процентов, а на сильно засоленных почвах они составляют до восьмидесяти процентов [2].

Для Мактааральского района в соответствии с классификацией климата по системе Кеппен-Гейгера, свойствен «субтропический сухой климат», который часто называют «средиземноморским» [3].

Особенностью климата является обилие солнечного света и тепла – число часов солнечного сияния составляет в среднем 2800-2900 за год, суммарный приток солнечной радиации 160-165 ккал/см² (6.5-6.7 ГДж/м²).

Среднегодовая температура воздуха по данным многолетних наблюдений в пределах описываемого района составляет +13,7°C. Наиболее низкая температура наблюдается в январе (-12,4°C), а наиболее высокая в июле (+30,2°C) (рисунок 1).

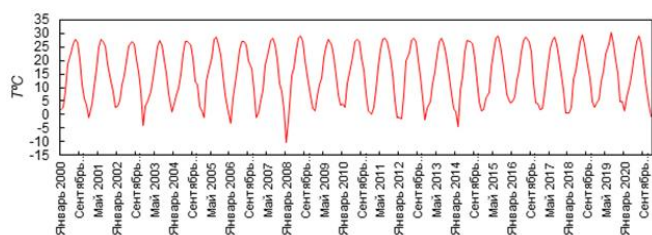


Рисунок 1. График изменения температуры воздуха по метеостанции Жетыбай за период 2000-2020 гг.

Годовое количество осадков на территории колеблется от 175 до 425 мм. Распределение осадков по сезонам следующее: весна является самым влажным периодом, на который приходится более 40% годовых осадков; зимой выпадает 25-35%; осенью — 15-20%; и летом — всего 5-10%. Испаряемость в рассматриваемом районе превышает 1200 мм в год, или 12 000 м³/га [4–6].

На рисунке 2 показана кривая обеспеченности количества атмосферных осадков за год X по метеостанции г. Жетыбай, а также полиномиальный тренд, наилучшим способом аппроксимирующий опытную выборку. Обеспеченность годового количества осадков рассчитывалась по формуле Чегодаева:

$$P = \frac{m - 0.3}{n + 0.4} 100 \%, \quad (1)$$

где m — порядковый номер анализируемых величин, расположенных в порядке убывания; n — объем анализируемой выборки ($n = 83$).

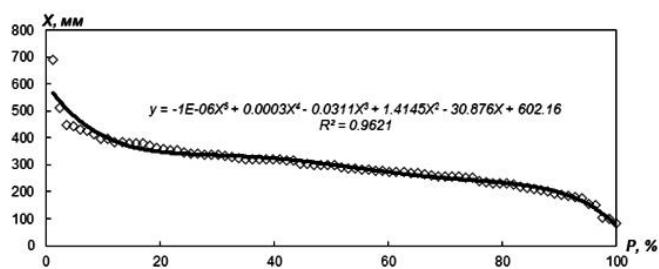


Рисунок 2. График обеспеченности суммарных годовых атмосферных осадков по метеостанции г. Жетыбай за многолетний период наблюдений

Показатели влажности воздуха в течение года сильно изменяются. Средняя абсолютная влажность воздуха составляет 8,3 мб, тогда как относительная влажность варьируется от 79% в феврале до 42% в июле.

Ветровой режим довольно устойчивый в течение года. Преобладающее направление ветров, юго-восточное. Среднегодовая скорость ветра составляет 1,9 м/с на западе и 2,5 м/с на востоке.

Снежный покров в регионе нестабилен с продолжительностью в 30-45 дней, а в отдельные годы он может отсутствовать вовсе. Весенние заморозки заканчиваются достаточно рано. Климат района отличается жарким летом с низкой влажностью, малым количеством осадков

и высокой испаряемостью. Для получения высоких урожаев необходимо орошение, которое должно не только восполнять недостаток влаги в почве, но и способствовать созданию благоприятного микроклимата на хлопковых полях.

Вся территория изучаемого района покрыта аккумулятивными формами рельефа и включает три комплекса речных террас: низкие, средние и высокие.

Естественные водотоки представлены рекой Сырдарья — одной из крупнейших рек Средней Азии, которая образуется при слиянии рек Нарын и Кара-Дарья. Сырдарья протекает на северо-востоке, вдоль восточной границы Мактааральского района, и имеет общую длину 2137 км. Максимальная скорость течения реки достигает 1,65 м/с, в среднем — 0,9–1,2 м/с. Глубина реки варьируется от 3,7 до 6,0 м, а ширина русла колеблется от 160 до 300 м (гидропост Кок-Булак) [7].

Сырдарьинская синеклиза, с геологической точки зрения, является мезокайнозойской платформенной структурой первого порядка, расположенной на гетерогенном эпипалеозойском фундаменте. Платформенный чехол имеет сложное строение и историю формирования, в развитии которого выделяются три стадии: рэт-юрская, мел-палеогеновая и олигоцен-четвертичная.

Тектоника района характеризуется расположением в пределах Ташкентской Голодностепской впадины. Впадина ограничена на севере Мансуратинской антиклиналью, на западе — южной частью Джаусумкум-Бельской антиклинальной зоны, на юге — Туркестанской и Нура-тинской антиклиналями, а на востоке — Кураминской, Кызылнура-Акташской и Угам-Каржантаусской мегаантиклиналями [7].

Геоморфология исследуемого района относительно проста и характеризуется аккумулятивным типом рельефа. Вся территория занята формами аккумулятивного рельефа, представленными тремя комплексами речных террас: низкими, средними и высокими.

В гидрогеологическом плане район расположен в юго-восточной части Сырдарьинского бассейна, который включает как напорные, так и безнапорные пластовые подземные воды, и находится в пределах Голодностепской депрессии, входящей в состав Приташкентского бассейна [7].

Континентальный климат района приводит к основному пополнению запасов подземных вод водоносных горизонтов и комплексов в осенне-зимний период, когда наблюдается максимальное количество осадков [7].

Искусственная сеть оросительных каналов, охватывающая территорию Голодной степи, дополнительно способствует пополнению запасов подземных вод верхних горизонтов за счет фильтрационных потерь воды. [7].

Орошение земель в Мактааральском районе Туркестанской области осуществляется через канал МК «Достык», который берет воду из реки Сырдарья в Республике Узбекистан. Канал имеет общую длину 113 км, из которых 49 км расположены на территории Казахстана. В начале канала расход воды составляет 230 м³/сек, а на участке, пересекающем границу Казахстана, уменьшается до 120 м³/сек. Для орошения используются внутрихозяйственные оросители первого порядка, такие как К-20, К-21, К-22, К-24 и К-26, с коэффициентом полезного действия от 0,85 до 0,87. Минерализация воды не превышает 1,0 г/л в течение вегетационного периода. Хими-

ческий состав воды — сульфатно-гидрокарбонатный, что делает ее подходящей для орошения сельскохозяйственных культур [7].

Согласно исследованиям, методы ДЗЗ эффективны для оценки урожайности хлопчатника, оценки уязвимости богарных и пахотных земель к засухам, оценки объема талых вод как источника питания рек, изучения участков осушенного морского дна для закладки растительности, картирования, анализа и выявления заброшенных сельскохозяйственных угодий, оценки потребности в оросительной воде для создания карт землепользования, а также для создания автоматизированной системы картирования орошаемых территорий.

Дистанционные методы зондирования Земли (ДЗЗ) активно используются в гидрогеологических и мелиоративных исследованиях, а также в изучении геологической и гидрогеологической среды. Интеграция этих методов с наземными наблюдениями на ключевых участках существенно увеличивает их точность и глубину анализа. С помощью ГИС и ДЗЗ можно эффективно анализировать разнообразные аспекты гидрологии и гидрогеологии, такие как геологические и почвенные характеристики, формы рельефа, дренажные системы, растительность, водные ресурсы, линеаменты, геологические структуры, антропогенные объекты, водоёмы и населённые пункты.

Методы дистанционного зондирования Земли (ДЗЗ) позволяют получать информацию о состоянии почвы и растений с помощью спутников и беспилотных летательных аппаратов [8]. В данной работе использованы мультиспектральные данные с космического аппарата Landsat-8. Одним из эффективных методов анализа спутниковых данных является математическое преобразование спектральных каналов в различные индексные изображения. Использование данных дистанционного зондирования Земли (ДЗЗ) в сочетании с анализом спектральных вегетационных индексов, индексов засоления и водных индексов позволяет оценить, как засоленность почв, уровень и минерализация грунтовых вод влияют на урожайность сырьцового хлопка на участках с разными мелиоративными условиями, как благоприятными, так и критическими.

Целью данного исследования является изучение региональных особенностей гидромелиоративных условий Мактааральского массива орошения (рисунок 3) и выявление участков с благоприятными мелиоративными условиями, оценка влияния засоленности почв, уровня и минерализации грунтовых вод на урожайность хлопка сырца на участках с мелиоративными условиями, с использованием оптико-электронных данных ДЗЗ и ГИС-технологий.

Для достижения поставленной цели проведен космический мониторинг участков с различными мелиоративными условиями. В качестве исходных данных обработаны космоснимки, на основе которых рассчитаны спектральные вегетационные индексы (VI), индексы засоления (SI) и водные индексы (WI), проведен анализ их вариаций с применением ГИС-технологий и интерпретация полученных данных.

Методы дистанционного зондирования активно используются в глобальной практике ирригации и мелиорации. В базе данных Web of Science представлено более 4000 научных публикаций на тему применения

ДЗЗ в этих областях, охватывающих как теоретические исследования, так и практические применения. Ведущими странами по количеству публикаций являются США, Германия, Испания, Индия и Китай. Наблюдается явный рост интереса к методам ДЗЗ в гидромелиоративных исследованиях, что подчеркивает их значительный потенциал для решения современных задач в сельском хозяйстве и управлении водными ресурсами.

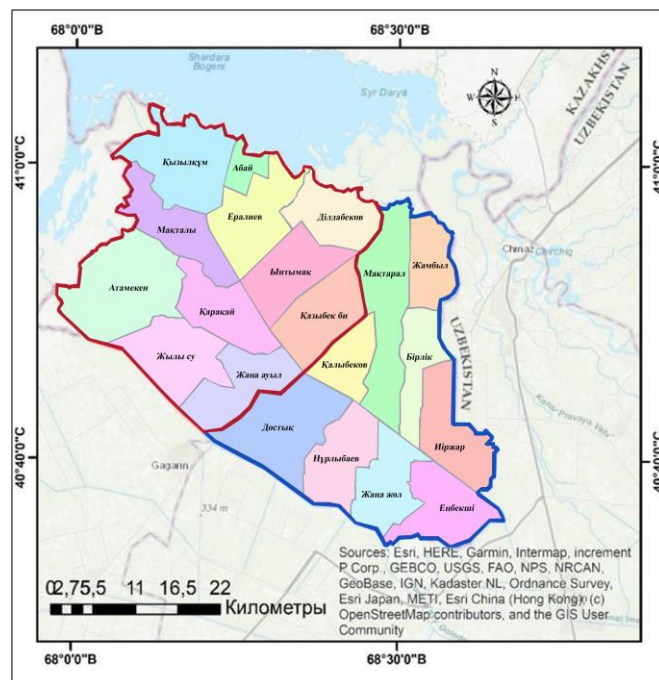


Рисунок 3. Карта административных границ районов и сельских округов Мактааральского массива орошения

По теме применения методов ДЗЗ в орошаемом земледелии на территории Казахстана, в базе Web of science имеются 18 опубликованных трудов. Из них основные труды приходится с участием ученых из Германии, Казахстана, США, Китая и Англии.

Методы дистанционного зондирования эффективны при районировании агроклиматических зон [9], картировании культур на орошаемых массивах [10], определении содержания химических элементов в почве [11], прогнозировании урожайности [12], борьбе с вредителями [13], оценке водного стресса растений [14] и других исследованиях.

2. Материалы и методы

Исходные материалы – картографический материал наземного обследования, спутниковые данные и метеоданные территории исследований. В качестве данных ДЗЗ использован долговременный ряд архивных безоблачных мультиспектральных изображений среднего разрешения Landsat-8 и Sentinel-2, территории Мактааральского района за вегетационный период с 2013 по 2021 годы. Картографический материал включает набор карт уровней грунтовых вод (УГВ), карт минерализации грунтовых вод (МГВ) и карт засоления почв исследуемой территории (рисунок 4) [15]. Из архива метеонаблюдений использованы данные по осадкам и температуре воздуха в регионе [21].

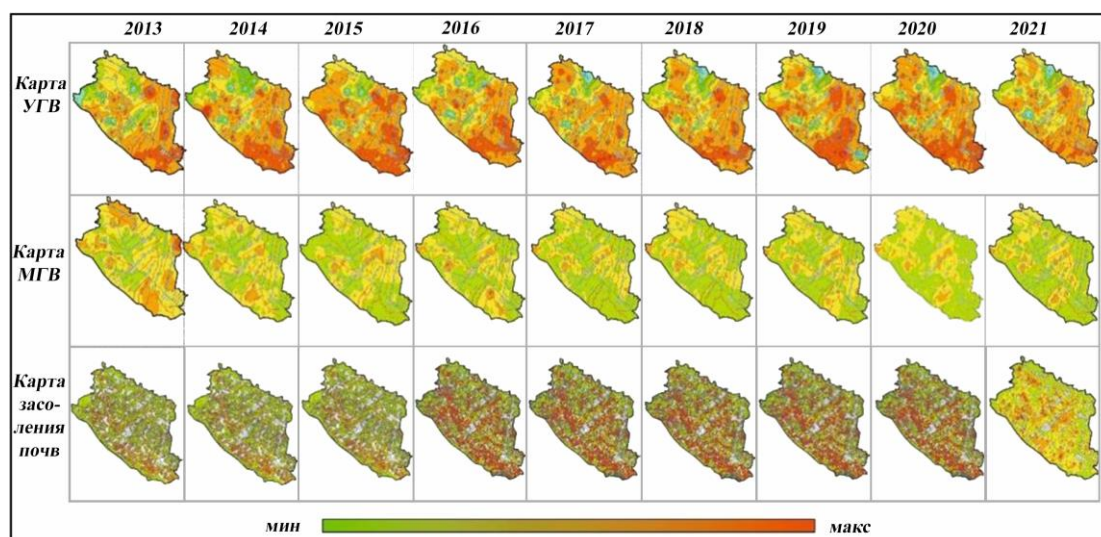


Рисунок 4. Оцифрованные карты УГВ, МГВ и засоления почв Мактааральского массива орошения с 2013 г. по 2021 г

В дополнение к оцифровке данных мелиоративного мониторинга были разработаны векторные карты орошаемых земель в исследуемом массиве. Для выделения полей использованы данные Sentinel-2 с пространственным разрешением 10 м на пиксель. Для лучшего выделения границ отдельных полей созданы RGB-композиции (R=b8 (ближний инфракрасный); G=b4 (красный); B=b2 (синий канал)) с акцентированием на инфракрасный канал, который информативен для детектирования растительного покрова (рисунок 5).

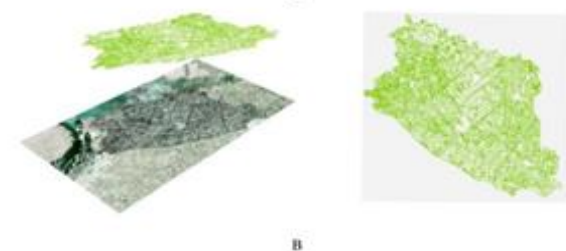
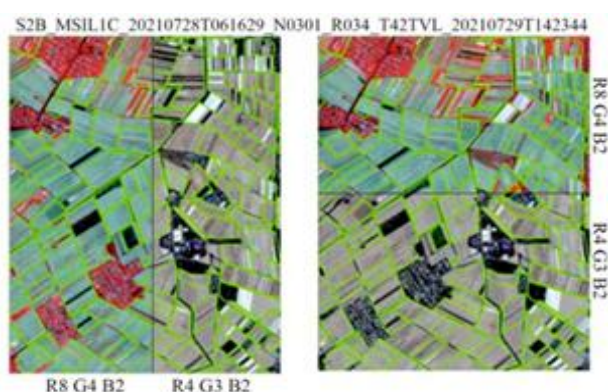


Рисунок 5. Оцифровка границ полей орошаемых земель Мактааральского массива с использованием спутниковых данных: а) использование RGB-композиций; б) атрибутивные данные векторных полей; в) визуализация векторных полей в 3d и 2d видах

Порядка 3000 векторных полей с геометрической информацией и атрибутивными данными содержит созданный шэйп файл, включая пространственные характеристики (площадь, периметр) и данные выращиваемых культур.

Анализ цифровых карт, созданных за период с 2013 по 2021 год, позволил определить участки с благоприятными мелиоративными условиями (рисунок 6).

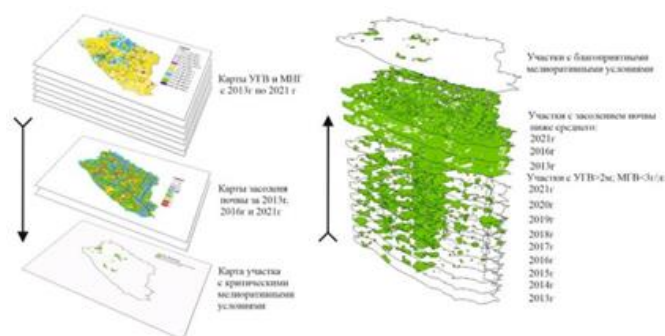


Рисунок 6. Методика выделения участков с благоприятными мелиоративными условиями орошаемых земель Мактааральского массива

Эти участки характеризуются тем, что в течение вегетационных периодов с 2013 по 2021 годы уровень грунтовых вод оставался ниже 2 метров, минерализация грунтовых вод не превышала 3 г/л, а степень засоления почв была ниже средней. Общая площадь таких участков не превышает 4200 га.

После определения участков с оптимальными мелиоративными условиями была проведена сортировка данных о хлопковых полях в этих зонах. При этом основным критерием было размещение центров отдельных хлопковых полей в пределах соответствующих полигонов (shp) как с критическими, так и с благоприятными мелиоративными условиями. В результате этого анализа в зонах с благоприятными мелиоративными условиями были идентифицированы семьдесят хлопковых полей, общей площадью не более 2100 га.

Чтобы увеличить информативность данных ДЗЗ, были выполнены спектральные преобразования исходных спутниковых изображений. Обработка спутниковой

информации, создание спектральных индексных изображений и мониторинг изменений на территории исследования осуществлялись в лицензионном программном обеспечении ArcGIS и Geomatica 2016.

Опираясь на мировой опыт применения данных дистанционного зондирования Земли, для определения наиболее информативных индексов в условиях критического и благоприятного мелиоративного состояния Мактааральского массива орошения были выбраны следующие популярные вегетационные индексы: NDVI, SAVI, GEMI, ARVI, IPVI, MTVI, TDVI, водные индексы: NDWI, MNDWI, индекс засоления NDSI. Данные индексы рассчитаны по формулам, указанным в таблице 1.

Таблица 1. Формулы спектральных индексов

Вид индекса	Наименование индекса	Формула	Источник
Вегетационные индексы	Normalised Difference VI (Нормализованный Разностный Вегетационный Индекс)	$NDVI = \frac{NIR - R}{NIR + R}$	[16]
	Soil Adjusted VI (Почвенный вегетационный индекс)	$SAVI = (1 + L) \frac{(NIR - R)}{(NIR + R + L)}$ где: $L = [0; 1]$	[17]
	Global Environmental Monitoring Index (Глобальный индекс мониторинга окружающей среды)	$GEMI = \eta(1 - 0.25\eta) - \frac{(R - 0.125)}{1 - R}$ где: $\eta = \frac{2(NIR^2 - R^2) + 1.5NIR + 0.5R}{NIR + R + 0.5}$	[18]
	Atmospherically resistant VI (Атмосферостойчивый Вегетационный Индекс)	$ARVI = \frac{NIR - Rb}{NIR + Rb}$ где: $Rb = Red - a$ (R - Blue), $a = 0.5$	[19]
	Infrared Percentage VI (Инфракрасный индекс вегетации в процентах)	$IPVI = \frac{NIR}{NIR + R}$	[20]
	Modified Triangular VI (Модифицированный треугольный вегетационный индекс)	$MTVI = 1.2[1.2(NIR - G) - 2.5(R - G)]$	[21]
	Transformed Difference VI (Преобразованный разностный вегетационный индекс)	$TDVI = 1.5 \frac{(NIR - R)}{\sqrt{NIR^2 + R + 0.5}}$	[22]
Водные индексы	Normalised Difference Water Index (Нормализованный Разностный Водный Индекс)	$NDWI = \frac{NIR - SWIR_1}{NIR + SWIR_1}$	[23]
	Modified Normalised Difference Water Index (Модифицированный нормализованный разностный водный индекс)	$MNDWI = \frac{G - SWIR_1}{G + SWIR_1}$	[24]
Индекс засоления	Normalised Difference Salinity Index (Нормализованный разностный индекс засоления)	$NDSI = \frac{SWIR_1 - SWIR_2}{SWIR_1 + SWIR_2}$	[25]

3. Результаты и обсуждение

Для анализа урожайности хлопка на участках с благоприятными и критическими условиями в Мактааральском районе выполнены следующие виды работ:

Оцифрованы карты засоления почв Мактааральского массива орошения, карты залегания уровня грунтовых вод, минерализации грунтовых вод за 2013-2021 годы.

Разработаны методики выделения участков с особыми мелиоративными условиями и полей в пределах этих участков. Определены критерии выбора данных ДЗЗ, выполнены поиск, загрузка и обработка архивных спутниковых данных среднего разрешения.

По данным ДЗЗ оцифрованы границы полей орошаемых земель массива исследования. Созданный шейп-файл включает 2970 векторных полей и детальные характеристики каждого поля.

Анализ изменений вегетационного индекса хлопковых полей за период наблюдения демонстрирует, что участки с оптимальными мелиоративными условиями показывают значения NDVI, которые в среднем на двенадцать процентов выше по сравнению с участками, где условия критические. При этом, среднесуточная температура воздуха и среднесеasonные осадки в вегетационный период имеют слабую связь с индексом NDVI (рисунок 7).

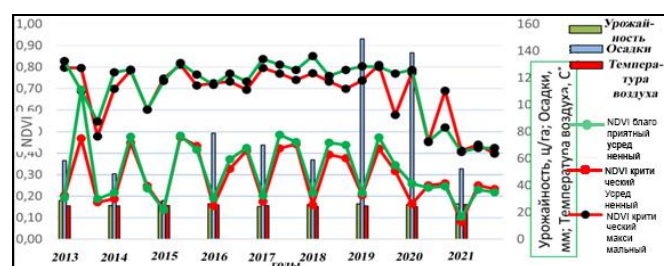


Рисунок 7. Сравнительный график динамики спектрального индекса NDVI хлопковых полей, на участках с благоприятными и критическими мелиоративными условиями с 2013г по 2021 г.

Анализ данных по индексу засоления NDSI для хлопковых полей в период наблюдения показывает, что на участках с оптимальными условиями этот индекс в среднем на десять процентов, чем на участках с неблагоприятными условиями. При этом, среднесуточная температура и среднесеasonные осадки в вегетационный период имеют слабую связь с уровнем NDSI (рисунок 8).

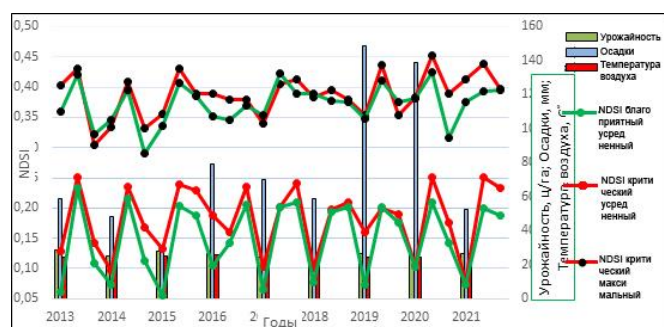


Рисунок 8. Сравнительный график динамики спектрального индекса NDSI хлопковых полей на участках с благоприятными и критическими мелиоративными условиями с 2013г по 2021 г.

Индекс NDSI показал слабую связь с картой почвенного засоления, созданной на основе данных полевых и лабораторных исследований. Его низкая информативность в данной выборке связана с интенсивной сельскохозяйственной и мелиоративной деятельностью в районе, включая обработку земли, рост всходов, вегетацию и промывку солей.

Анализ изменения водного индекса NDWI на хлопковых полях в период наблюдения показал, что значения NDWI на участках с хорошими мелиоративными условиями в среднем на шесть процентов ниже, чем на территориях с критическими условиями. Среднесуточные температуры воздуха и среднесесячные осадки в течение вегетационного периода практически не коррелируют с индексом NDWI (рисунок 9).

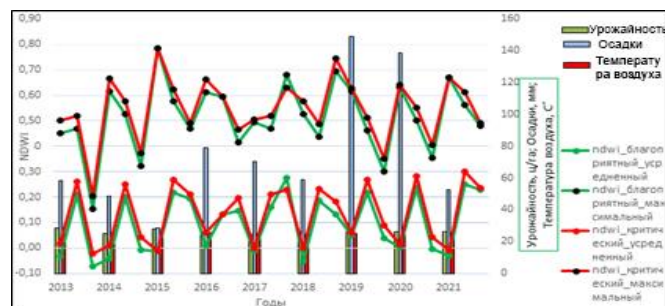


Рисунок 9. Сравнительный график динамики спектрального индекса NDWI хлопковых полей, на участках с благоприятными и критическими мелиоративными условиями с 2013г по 2021 г.

Анализ вегетационных индексов на участках с благоприятными гидрогеологическими условиями показывает значительный рост значений индексов, в частности NDVI показывает рост на 10-12%, что соответствует диапазону 0.12-0.19, увеличение SAVI на 8-10%, дает значения в диапазоне от 0.12 до 0.28; ARVI показывает рост на 7-10%, со значениями в диапазоне 0.1-1.15. GEMI увеличился на 3-5%, попав в диапазон от 0.09 до 0.1. IPVI также показывает рост на 3-5%, со значениями в диапазоне от 0.05 до 0.1. MTVI показывает рост на 12-15%, со значениями в диапазоне от 0.09 до 0.4. Наконец, TDVI показывает рост на 12-15%, попав в диапазон от 0.09 до 0.21.

График динамики SAVI за вегетационный период показывает три ключевых временных этапа созревания растительности. Первый этап охватывает период с конца марта до конца мая, когда проходят посевные работы, начинается раннее созревание семян и появляются всходы. В этот период индекс SAVI демонстрирует устойчивый рост. Второй этап - с конца июня до конца августа - характеризуется активным созреванием хлопчатника, и в это время индекс вегетации приобретает параболическую форму с пиком в середине августа. Третий этап длится со второй декады сентября до начала ноября и связан со сбором урожая. Данные Landsat-8 с 2013 по 2021 год подбирались с учетом этих временных фаз созревания растений.

На территории Мактааральского массива орошения наиболее информативными вегетационными индексами оказались NDVI с годовым диапазоном изменений порядка 40 процентов и SAVI с диапазоном сорока пяти процентов. Наименьшую информативность показали индексы IPVI и GEMI, с диапазонами изменений в течение года 20% и 10% соответственно.

Также проведена оценка корреляции вегетационных индексных изображений с метеоданными, включая среднесуточную температуру воздуха и среднесесячные суммы осадков.

Полученные результаты показали, что спектральные индексы и их вариации отражают засоленность почвы, уровень и минерализация грунтовых вод, которые в свою очередь оказывают значительное влияние на урожайность хлопка. В частности, высокие значения индексов засоления и низкие значения водных индексов коррелируют с уменьшением урожайности. При этом благоприятные мелиоративные условия способствуют увеличению урожайности даже при наличии высоких значений засоленности.

4. Выводы

Спектральные вегетационные индексы SAVI (Soil-Adjusted Vegetation Index) и NDVI (Normalized Difference Vegetation Index) являются более информативными, чем остальные индексы (GEMI, ARVI, IPVI, MTVI, TDVI) в благоприятных мелиоративных условиях Мактааральского массива орошения. Это связано с тем, что SAVI и NDVI относятся к наиболее широко используемым и проверенным индексам для оценки вегетации на основе данных спутникового зондирования Земли. SAVI учитывает коррекцию наличия почвенного фона, что делает его более точным в условиях с высоким содержанием почвы или воды. NDVI, в свою очередь, основан на различии между поглощенным и отраженным светом растениями, что позволяет более точно определить степень их зеленого охвата. Таким образом SAVI и NDVI обеспечивают наиболее информативные данные о состоянии вегетации, так как учитывают различные свойства растительного покрова и окружающей среды.

Вегетационные индексы на хлопковых полях, расположенных в зонах с хорошими мелиоративными условиями, показывают более высокие значения по сравнению с полями в критических условиях. Эти различия в показателях свидетельствуют о том, что урожайность хлопка-сырца на полях с благоприятными условиями как минимум на 10% выше, чем на участках с неблагоприятными мелиоративными условиями. Таким образом, в условиях критических и благоприятных мелиоративных условий вегетационные индексы отражают изменения в растительности и информативны при принятии решений по управлению земледелием и орошением хлопковых полей.

Индекс засоления NDSI (Normalized Difference Soil Index) в критических и благоприятных мелиоративных условиях Мактааральского массива орошения не имеет линейной зависимости с полевыми данными солевой съемки почв. Отсутствие высокой корреляции между индексом засоления NDSI и полевыми данными солевой съемки может быть связано с тем, что NDSI отражает только поверхностные уровни засоления, в то время как полевая съемка учитывает и более глубокие слои почвы, а также другие факторы, влияющие на засоление.

На полях с оптимальными мелиоративными условиями значения NDSI в среднем на 18% ниже по сравнению с участками, где условия критические. Это подчеркивает важность включения индекса засоления NDSI в анализ урожайности хлопка, так как он позволяет оценить уровень поверхностного засоления и его влияние на растения. NDSI позволяет выявить участки с повышенным засолением, которые могут оказывать негативное воздействие на развитие хлопковых растений.

Таким образом, NDSI может быть использован для оптимизации мероприятий по мелиорации и улучшению условий выращивания хлопчатника.

Для анализа воды и влажности по данным Landsat-8 использовались индексы NDWI (Normalized Difference Water Index) и MNDWI (Modified Normalized Difference Water Index). Отметим, что MNDWI учитывает также влияние влажности почвы, в то время как NDWI сконцентрирован исключительно на воде. Изменения нормализованного разностного водного индекса NDWI в течение года имеют большую амплитуду по сравнению с индексом MNDWI. На участках с оптимальными мелиоративными условиями значения водных индексов NDWI и MNDWI заметно ниже, чем на участках с неблагоприятными условиями, разница достигает 15-25%.

Корреляция метеоданных, включая среднесуточную температуру воздуха и среднемесячную сумму осадков, со значениями индексных изображений (индексов вегетации, индекса засоления, водного индекса) в вегетационный период оказалась низкой.

Таким образом, использование данных ДЗЗ и анализ спектральных индексных изображений позволяет оценить влияние засоленности почв, уровня и минерализации грунтовых вод на урожайность хлопка, что в свою очередь позволяет разработать эффективные меры по улучшению условий выращивания культуры и повышению урожайности.

Дальнейшие исследования в этой области могут помочь развить новые методы мониторинга и управления гидромелиоративными процессами в сельском хозяйстве.

Финансирование

Работа проводилась в рамках ЦНТП «Ресурсы подземных вод как основной резерв устойчивого орошаемого земледелия Казахстана» No BR 21882211.

References / Литература

- [1] Abdrahmanova, N.B., Umbetov, A.K. & Bakenova, Zh.B. (2020). Ekologo-meliorativnoe sostojanie oroshaemyh zemel' Turkestanskoy oblasti Kazahstana. *Materials of the XVI international scientific and practical conference, Sheffield Science and Education LTD*
- [2] Climate Database. Climate of Kazakhstan. Retrieved from: <https://ru.climate-data.org/азия/казахстан-83/>
- [3] Z.D. Klykova. (1954). Klimatologicheskij spravochnik SSSR. Kazahskaja SSR. Meteorologicheskie dannye za otdel'nye gody. Temperatura vozduha (Issue I, Volume II). L.: Gidrometeoizdat
- [4] Spravochnik po klimatu SSSR. (1966). Kazahskaja SSR. Temperatura vozduha i pochvy (Issue II). L.: Gidrometeoizdat
- [5] Spravochnik po klimatu SSSR. (1968). Kazahskaja SSR. Vlazhnost' vozduha, atmosferynye osadki, snezhnyj pokrov (Issue IV.). L.: Gidrometeoizdat
- [6] Database. Bureau of National Statistics of the Agency for Strategic Planning and Reforms of the Republic of Kazakhstan. Retrieved from: https://stat.gov.kz/ru/industries/business-statistics/stat-forrest-village-hunt-fish/publications/5099/?sphrase_id=83129
- [7] Onlasynov, Zh.A. (2021). Gidrogeologicheskie uslovia oroshaemyh massivov Maktaaral'skogo rajona. *Trudy Satpaevskih chtenij (Volume I), Almaty*
- [8] Onglassynov, Zh. & Shagarova, L.V. (2022). GIS assessment of the state of the Maktaral irrigated lands and the possibility of reuse of collector-drainage water. *3i: Intellect, Idea, Innovation*, (2), 158-164. https://doi.org/10.52269/22266070_2022_4_158
- [9] Onglassynov, Zh., Yerikuly, Zh., Muratova, M. & Akynbayeva, M. (2022). Dynamics of spectral indices of remote sensing data on the example of irrigated lands of East Kazakhstan. *3i: intellect, idea, innovation*, (3), 134-141. https://doi.org/10.52269/22266070_2022_3_134
- [10] Al-Shammari, D., Fuentes, I., Whelan, B.M., Filippi, P. & Bishop, T. (2020). Mapping of Cotton Fields Within-Season Using Phenology-Based Metrics Derived from a Time Series of Landsat Imagery. *Remote Sensing*, 12(18). <https://doi.org/10.3390/rs12183038>
- [11] Dionizio, E.A., Pimenta, F.M., Lima, L.B. & Costa, M.H. (2020). Carbon stocks and dynamics of different land uses on the Cerrado agricultural frontier. *Plos One*, 15(11). <https://doi.org/10.1371/journal.pone.0241637>
- [12] Gerts, J., Juliev, M. & Pulatov, A. (2020). Multi-temporal monitoring of cotton growth through the vegetation profile classification for Tashkent province, Uzbekistan. *Geoscape*, 14(1), 62-69. <https://doi.org/10.2478/geosc-2020-0006>
- [13] Iost, F.H., Heldens, W.B., Kong, Z.D. & de Lange, E.S. (2020). Drones: Innovative Technology for Use in Precision Pest Management. *Journal of Economic Entomology*, 113(1), 1-25. <https://doi.org/10.1093/jee/toz268>
- [14] Li, H. L., Wang, G. J., Dong, Z., Wei, X. K., Wu, M. J., Song, H. H. & Amankwah, S. O. Y. (2021). Identifying Cotton Fields from Remote Sensing Images Using Multiple Deep Learning Networks. *Agronomy*, 11(1). <https://doi.org/10.3390/agronomy11010174>
- [15] Report. (2021). Otchet o meliorativnom sostojanii oroshaemyh zemel' Juzhno-Kazahstanskoy oblasti za 2000-2019. *RGU «JuKGGMJe», Shymkent*
- [16] Aparicio, N., Villegas, D., Royo, C., Casadesus, J. & Araus, J. L. (2004). Effect of sensor view angle on the assessment of agronomic traits by ground level hyper-spectral reflectance measurements in durum wheat under contrasting Mediterranean conditions. *International Journal of Remote Sensing*, (25), 1131-1152. <https://doi.org/10.1080/0143116031000116967>
- [17] Ahamed, T., Tian, L., Zhang, Y. & Ting, K.C. (2011). A review of remote sensing methods for biomass feedstock production. *Biomass & Bioenergy*, (35), 2455-2469. <https://doi.org/10.1016/j.biombioe.2011.02.028>
- [18] Pinty, B. & Verstraete, M.M. (1992). GEMI: a non-linear index to monitor global vegetation from satellites. *Plant Ecology*, (101), 15-20. <https://doi.org/10.1007/bf00031911>
- [19] Bannari, A., Morin, D., Bonn, F. & Huete, A.R. (1995). A review of vegetation indices. *Remote Sensing Reviews*, (13), 95-120. <https://doi.org/10.1080/02757259509532298>
- [20] Crippen, Robert E. (1990). Calculating the vegetation index faster. *Remote Sensing of Environment*, (1), 71-73. [https://doi.org/10.1016/0034-4257\(90\)90085-z](https://doi.org/10.1016/0034-4257(90)90085-z)
- [21] Haboudane, Driss, Miller, John R., Pattey, Elizabeth, Zarco-Tejada, Pablo J., Strachan, Ian B. (2004). Hyperspectral vegetation indices and novel algorithms for predicting green LAI of crop canopies: Modeling and validation in the context of precision agriculture. *Remote Sensing of Environment*, (90), 337-352. <https://doi.org/10.1016/j.rse.2003.12.013>
- [22] Bannari, A. (2002). Transformed difference vegetation index (TDVI) for vegetation cover mapping. *Geoscience and Remote Sensing Symposium*, (5), 3053-3055. <https://doi.org/10.1109/IGARSS.2002.1026867>
- [23] Apan, A., Held, A., Phinn, S., Markley, J. (2003). Formulation and assessment of narrow-band vegetation indices from EO-1 hyperion imagery for discriminating sugarcane disease. *Spatial Sciences Institute Conference: Spatial Knowledge Without Boundaries (SSC2003), Spatial Sciences Institute*
- [24] Xu, H. (2006). Modification of Normalised Difference Water Index (NDWI) to Enhance Open Water Features in Remotely Sensed Imagery. *International Journal of Remote Sensing*, (14), 3025-3033
- [25] Al-Khaier, F. (2003). Soil Salinity Detection Using Satellite Remotes Sensing. *International institute for Geo-information science and earth observation, Enschede, The Netherlands*

Мақтаарал суару массивінің гидромелиоративтік жағдайының қолайлы аймақтардағы спектрлік көрсеткіштердің өзгеруін бағалау

Ж.Ә.Оңласынов^{1*}, Л.В.Шагарова², М.М.Муратова¹

¹У.М. Ахмедсафин атындағы Гидрогеология және геоэкология институты, Алматы, Қазақстан

²Ресей Ғылым академиясы Сібір бөлімшесінің Омбы ғылыми орталығының Радиофизика және физикалық электроника институты, Омск, Ресей

*Корреспонденция үшін автор: zhuldyzbek.onlasynov@mail.ru

Андатпа. Қазіргі уақытта ғарыштық технологиялар ауылшаруашылық мониторингінің құрамдас бөлігі болып табылады, олар жерді қашықтықтан зондтауды, оның ішінде өсімдіктердің жай-күйін бақылауды қамтамасыз етеді. Мониторингтік зерттеулердің негізгі құралдарының бірі Landsat ғарыш аппаратының бейнелеу жабдықтары болып табылады. Оптикалық-электрондық спутниктік бейнелеу әртүрлі спектрлік диапазондарда жүзеге асырылады. Landsat спутниктерінің сериясы орташа кеңістіктік рұқсаттың эталондық дәлдігі бар тарихи деректердің ұзақ мерзімді сериясына ие. Бұл мақалада жерді қашықтықтан зондтау әдістерін және суармалы алқаптардың гидрогеологиялық жағдайларының ауыл шаруашылығы өніміне әсерін зерттеуге арналған ГАЖ технологияларын қамтитын кешенді тәсіл ұсынылған. Түркістан облысындағы Мақтаарал суару массивінің аудандарында топырақтың тұздылығы, жер асты суларының деңгейі мен минералдануының шитті мақта өніміне әсерін зерттеу үшін 2013-2021 жылдар аралығындағы Landsat-8 спутниктік суреттері қашықтықтан зондтау деректері ретінде пайдаланылды. Осы факторлардың әсерін бағалау үшін өсімдіктердің спектрлік көрсеткіштері, тұздылық көрсеткіштері және су индекстері есептеліп, талданған. Алынған индекстік суреттер мелиоративтік жағдайы қолайлы аймақтардағы шитті мақта шығымдылығының айырмашылығын анықтауға мүмкіндік берді. Өсімдік жамылғысының спектрлік көрсеткіштерін пайдалана отырып, мақта өсімі ең белсенді аймақтарды анықтауға, сондай-ақ топырақтың сортаңдануы мен жер асты суларының жеткіліксіз деңгейіне байланысты болуы мүмкін өнімділігі төмен аймақтарды анықтауға мүмкіндік берді. Топырақтың тұздылығының жоғары болуы және жер асты суларының жоғары минералдануы шитті мақтаның өніміне кері әсерін тигізеді. Осылайша, өсімдіктердің спектрлік көрсеткіштерін, тұздылық көрсеткіштерін және су көрсеткіштерін талдау ауыл шаруашылығы дақылдарының өнімділігіне әсер ететін факторларды дәлірек анықтауға және қолайсыз жағдайлары бар жерлерде өнімділікті арттыру үшін қажетті шараларды қабылдауға мүмкіндік береді.

Негізгі сөздер: Мақтаарал суару массиві, дренаждық жағдайлар, қашықтықтан зондтау деректері, ГАЖ технологиялары, мақта; индекстік суреттер, өсімдік жамылғысының көрсеткіштері, су индекстері, тұздылық индексі.

Оценка вариаций спектральных индексов на участках с благоприятными гидромелиоративными условиями Мактааральского массива орошения

Ж.А.Оңласынов^{1*}, Л.В.Шагарова², М.М.Муратова¹

¹Институт гидрогеологии и геоэкологии им У.М. Ахмедсафина, Алматы, Казахстан

²Институт радиофизики и физической электроники Омского научного центра Сибирского отделения Российской академии наук, Омск, Россия

*Автор для корреспонденции: zhuldyzbek.onlasynov@mail.ru

Аннотация. В настоящее время космические технологии - неотъемлемая часть сельскохозяйственного мониторинга, предоставляют возможность проводить дистанционное зондирование Земли, в том числе мониторинг состояния растительности. Одним из основных инструментов для мониторинговых исследований является съемочная аппаратура космического аппарата Landsat. Оптико-электронная спутниковая съемка осуществляется в различных спектральных диапазонах. Серия спутников Landsat имеет длительный временной ряд архивных данных с эталонной точностью среднего пространственного разрешения. В данной статье предложен комплексный подход, включающий в себя методы дистанционного зондирования Земли и ГИС-технологии для изучения влияния гидрогеологических условий орошаемых массивов на урожайность сельскохозяйственных культур. В качестве данных ДЗЗ использовались космоснимки Landsat-8 за период с 2013 по 2021 годы для изучения влияния засоленности почв, уровня и минерализации грунтовых вод на урожайность хлопка сырца на участках Мактааральского массива орошения Туркестанской области. Для оценки влияния этих факторов были рассчитаны и проанализированы спектральные вегетационные индексы,

индексы засоления и водные индексы. Полученные индексные изображения позволили выявить различия в урожайности хлопка сырца на участках с благоприятными мелиоративными условиями. С помощью спектральных вегетационных индексов удалось определить зоны с наиболее активным ростом хлопка, а также выявить участки с низкой урожайностью, что может быть связано с засолением почв и недостаточным уровнем грунтовых вод. Высокий уровень засоленности почв и высокая минерализация грунтовых вод негативно сказываются на урожайности хлопка сырца. Таким образом, анализ спектральных вегетационных индексов, индексов засоления и водных индексов позволяет более точно определить факторы, влияющие на урожайность сельскохозяйственных культур и принять необходимые меры для повышения урожайности на участках с неблагоприятными условиями.

Ключевые слова: Мактааральский массив орошения, гидромелиоративные условия, данные ДЗЗ, ГИС-технологии, хлопок, индексные изображения, вегетационные индексы, водные индексы, индекс засоления.

Received: 09 July 2024

Accepted: 15 October 2024

Available online: 31 October 2024

Comparative analyzing the technology of predicting reservoir properties according to seismic data based on linear and nonlinear prediction algorithms

A.N. Dzhangirov¹, G.K. Bekbaltina^{1*}, G.K. Umirova², R.G. Temirkhanova², F.N. Abdoldina²

¹LLP Professional Geo Solutions Kazakhstan, Almaty, Kazakhstan

²Satbayev University, Almaty, Kazakhstan

*Corresponding author: bekbaltinagk@gmail.com

Abstract. The article deals with the results of dynamic interpretation of 3D CDPM seismic data in combination with logging data. The authors were faced with the task of comparing the results of pre-stack seismic inversion and neural learning technology in the conditions of the Arykty gas condensate field. The reason for this was the low seismic knowledge of the studied area, the fairly good predicted prospects for oil and gas content in the region, and the need to study the criteria for selecting a particular dynamic interpretation procedure. In this regard, an attempt was made to consider the structure and oil and gas content of the Arykty gas condensate field from the point of view of a comparative analysis between pre-stack inversion, which is currently actively used in the geological exploration industry within the framework of a standard interpretation graph, and neural machine learning. Justification for the relevance of the studies performed is availability of new wells and updated logging data, the ability to update and to compare the results of synchronous pre-stack inversion, and the ability to test neural learning algorithms. The conducted studies make it possible to identify criteria for the preferential use of machine learning in the conditions of the Arykty field, to take a fresh look at the features of the internal structure of the rocks that make up the productive part of the section, and to demonstrate physically the advantages of machine learning results in comparison with pre-stack seismic inversion.

Keywords: Arykty gas condensate field, Shu-Sarysu sedimentary basin, dynamic interpretation, neural networks, pre-stack seismic inversion.

1. Introduction

The economy of Kazakhstan still depends on the development of the mineral resources complex. At the same time, one should consider that the search and exploration of mineral resources is carried out in complicated conditions of increasing the depth of studies aimed at detecting complex reservoirs and missed intervals. The depletion and water content of most oil and gas fields in Kazakhstan play their role, too. But the needs of the present-day economy for hydrocarbon raw materials are indisputable, and work to replenish oil and gas reserves must continue. Traditionally, the Caspian, Mangyshlak and the other sedimentary basins are considered potential zones with high prospects for oil and gas. For example, in 2023, the largest volume of gas production occurred in the Atyrau region (11.5 billion cubic meters of gas). The West Kazakhstan region was in the second place (9.3 billion cubic meters of gas). The top three for gas in liquid or gaseous state is completed by the Aktope region, and in natural gas by the Mangistau region.

However, the available geological and geophysical data of the oil and gas bearing areas of Southern Kazakhstan (the Shu-Sarysu, the Ili, and the Balkhash sedimentary basins) show that it is necessary to reconsider and to carry out a serious revision of ideas about the prospects of these territories[1]. For example, the Shu-Sarysu gas-bearing region includes the Ucharal and Muyunkum gas-bearing districts. The region gas

prospects were proven by the discovery of the first Pridorozhnoe gas field in 1971, and by 1986, eight gas fields had already been identified. The Pridorozhnoe, the Amangeldy and the Arykty fields are the most significant of them.

Based on the results of more than 40 years of exploration work, the Shu-Sarysu basin has a very complex geological structure, a tense geodynamic history. The degree of geological and geophysical knowledge of the Shu Sarysu basin territory does not allow giving a reasonable assessment of its generation capabilities in relation to hydrocarbons. The proximity of the Shu-Sarysu basin to a number of large cities and industrial centers of Central and Southern Kazakhstan will make it an ideal source of Kazakh gas supplies if sufficient reserves are discovered [2].

1.1. Relevance

The relevance of the presented research is justified by several factors. Firstly, the draft Roadmap for increasing commercial gas volumes provides for launching several fields of the QazaqGaz national company. Active work is underway at the Anabay field that is located in the Moyynkum district of the Zhambyl region. Its commissioning is planned for the third quarter of 2023. The Pridorozhnoye field that is located in the Sozak district of the Turkestan region, also has high gas prospects. Here, at the end of 2024, construction and mounting work of an integrated gas treat-

ment plant (GTP) begins. Secondly, according to geologists, the Shu-Sarysu, Mangyshlak and Zaisan sedimentary basins can provide the basis for global leadership in the field of sustainable energy development.

Thirdly, the studied area is characterized by rather low geophysical knowledge. In particular, the structure of Arykty was first identified in 1967 by the inflection of layers on seismic profile 5-67. Through the Ili geophysical expedition, the structure was confirmed and studied in detail in 1970 by the network of search seismic profiles. Seismic profiling in the work area traced reflecting horizons II (base of the Lower Permian salt-bearing strata), III (base of the Visean carbonates), IV (base of the Famennian). Only reflecting horizon III is regionally consistent throughout the entire area of the Shu-Sarysu depression, while the rest ones are traced uncertainly and are studied rather poorly. Deep prospecting wells confirmed the structural plan as a whole and established a relative error in making the structural plan up to 50 m in the southern part of the structure, on the basis of which a reinterpretation of seismic survey materials was carried out. It did not note any fundamental changes in the structure along the roof of the structure. In 2008, detailed seismic exploration work of CDPM 2D was carried out by the Kazakh Geophysical Company LLP, as a result of which the geological structure in the area was clarified and structural maps were constructed for the target reflecting horizons. The inherited nature of the territory development and the Late Hercynian time of formation of local structures were confirmed with recommendations for continued study of the Sultankuduk, Kashkynbay and Kashkynbay Western, Zharkum, Kumyrlı and Koskuduk, Arykty and Anabay structures. The field seismic surveys of CDPM 3D were carried out only in 2016 by the GEOKOM LTD; the processing and interpretation of these materials was carried out by the Professional Geo Solutions Kazakhstan LLP in 2017. Thus, at the present stage, the field is characterized by rather low knowledge [1].

Fourthly, according to statistical calculations by specialists, the potential of the Shu-Sarysu basin is quite high. However, their reliability requires confirmation through a significant amount of complex geophysical work with delineation of local objects and oil and gas exploration drilling within them [2].

Finally, since the level of production of the Amangeldy field does not ensure full utilization of the gas processing facility, the Amangeldy Gas LLP subsoil user made the decision on additional exploration and commissioning of gas fields that are small in size, and reserves that are located in close proximity to the Amangeldy field. Such a field can be considered the Arykty gas condensate field that is located within the Moyynkum district of the Zhambyl region of the Republic of Kazakhstan, 170 km north of the city of Taraz. It was discovered and then opened in 1971. The field was studied in detail by CDPM 2D seismic exploration and its industrial gas content is confined to the Lower Visean and Tournaisian stages of the Carboniferous and terrigenous deposits of the salt-bearing Permian of the Muyunkum depression. Studying the gas content of the Permian deposits was carried out by structural prospecting, and of the Lower Carboniferous deposits by deep prospecting drilling. The deposits are strata domed, tectonically shielded. The Upper Devonian and Lower Permian reservoirs are represented by sandstones with 10-18% porosity, the Lower Carboniferous (Visean-Serpukhovian) ones are represented by fractured limestones with porosity of up to 4%, the extraction and study of which

in modern conditions is the focus of the operator's efforts. The stock and published literature states that the Arykty gas field is confined to a brachyanticlinal structure of a very simple isometric shape complicated by faults (Figure 1, a).

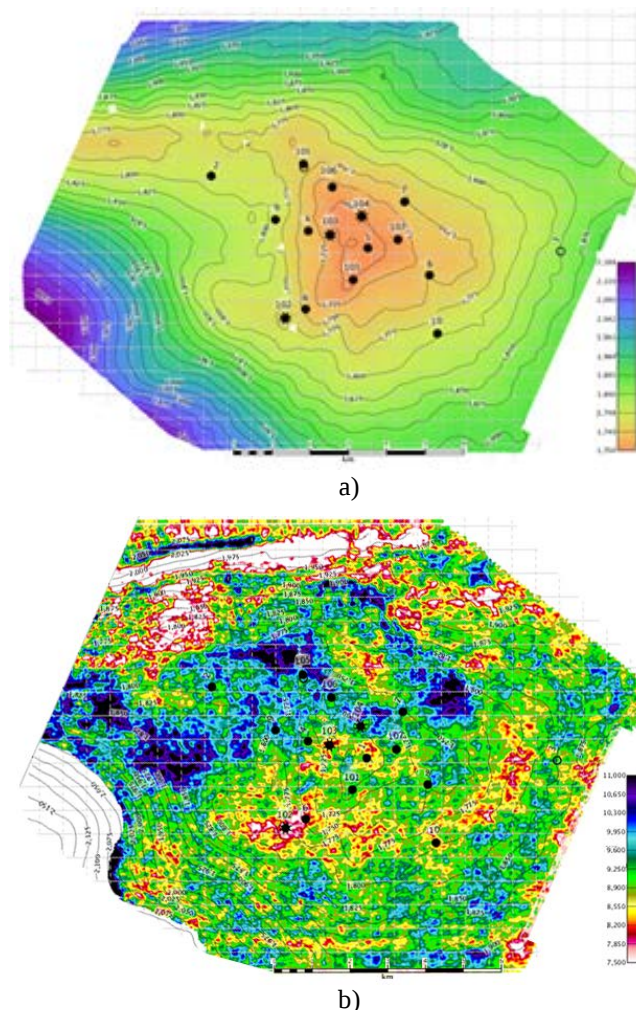


Figure 1. Structural map (a) of the top of the Lower Visean deposits and the result of seismic data inversion (b) superimposed on the structural map

However, the observed well flow rates allow drawing some conclusions about the non-anticlinal model of the field [1]. Among the 8 deep exploration wells, gas inflows with flow rates from 10 to 70 thousand m³/day (from the Lower Visean horizon) were obtained in wells 1, 6, and non-industrial inflows were obtained in wells 2, 7. In the interval from 2016 to 2020, a weak gas influx was obtained from well 101 that is located in the dome of the structure. CDPM 3D seismic surveys carried out in 2017 proved the optimal structural conditions for the location of well 101 (Figure 1, a), which, however, was not confirmed by the results of dynamic analysis of seismic amplitudes (Figure 1, b). Quite high production volumes were shown by drilling wells 102 and 103 that were laid according to the results of seismic studies (Figure 2), while it should be noted that well 102 is located on the periphery of the structure. Further drilling of several wells did not produce significant flow rates. With such drilling results, it is obvious that for the Arykty field, alongside with the structural factor, the facies distribution factor in the Lower Visean interval is no less decisive, which makes it possible to characterize confidently the deposits as non-anticlinal type traps [1].

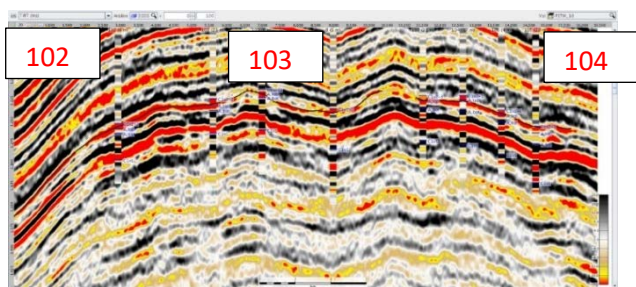


Figure 2. Seismic section along the well line. Wells with different initial flow rates are shown in red

The purpose of the presented study is to predict hydrocarbon deposits in terrigenous reservoirs associated with non-anticlinal traps based on reprocessing and reinterpretation of CDPM 3D seismic data.

The purpose was achieved by solving the following tasks:

- 1) analyzing the features of the reprocessing graph in the conditions of the Arykty field;
- 2) studying the results of the analysis of elastic properties at the level of the Serpukhov and Lower Visian reservoirs based on pre-stack seismic inversion;
- 3) comparative analysis of the technology for predicting reservoir properties from seismic data based on linear and nonlinear prediction algorithms.

The basis for reprocessing and reinterpretation of the 2017 CDPM 3D seismic data was a high level of interference of various natures and a low signal-to-noise ratio. To solve these problems, there was used the Professional Geo Solutions Kazakhstan LLP software package with special procedures. A comprehensive analysis of testing results and careful selection of parameters made it possible to select the optimal sequence of the procedures used, which helped improving the quality of the final results and solving the tasks assigned to processors. Here there are considered some features of the selected processing graph.

1. Noise attenuation. Low-frequency interference waves were effectively suppressed by 3D procedures, linear noise with the use of an FK filter, interference waves and random residual noise with the use of the Omnis procedure in a cascade version. Through extensive testing, as well as application of the results to data from both the cross-matching, CDPM and global removal domains, extensive attribute analysis, and ongoing quality control, noise was successfully suppressed.

2. The processes that consider the effect of surface conditions. To perform more effectively the noise analysis and multiple wave suppression, such procedures as surface-consistent amplitude balancing (Scscale), amplitude scalars, and deconvolution with different prediction intervals for the upper target part of the data were widely used.

Since the work area is characterized by a complex geological structure, four stages of speed analysis were performed in the studied area. At the fourth stage, automatic high-density velocity picking was used, which made it possible to obtain a velocity function and to improve the quality of horizon tracing. The analysis of kinematic corrections was carried out over the area using the own software package, which made it possible to select the most optimal speeds and to obtain a standard speed cube. Thanks to four stages of the speed analysis, the final kinematic corrections introduced resulted in flat boundaries in the CDPM region, and ensured the construction

of an optimal image in the stacking region. A separate issue is that of correcting residual statics. The adoption of the optimal version for entering static corrections made it possible to improve the quality of horizon traceability.

3. Improved representation of all the single waves and identification of low-amplitude faults and other tectonic disturbances. Isotropic pre-stack time migration with true amplitude preservation using curved ray paths in travel time calculations (TAPSTM) was used.

4. Interpolation in the CDPM area filled the “holes” and qualitatively improved the data. This type of interpolation made it possible to formulate full-fledged regular removal plans.

5. Q-compensation. The use of phase Q-compensation (before deconvolution) ensured that a wide spectrum of the signal was obtained.

In addition to temporary processing, seismic data from the Arykty site were processed using the GMDS technology. The depth-velocity model was formed on the basis of seismic velocities, tomography algorithms with calibration to the velocity data available for that year in wells 8 and G-4.

Thus, special surface-matched procedures in addition to various amplitude scalars and spectral balancing allowed for improved dynamics and data quality.

The authors of the article would like to dwell on some procedures for the dynamic interpretation of seismic data, since their results are quite interesting from the point of view of the stated purpose of the study. Synchronous pre-stack inversion was updated to provide the comparative analysis based on new well data, as this process produced results related to longitudinal and transverse impedances, which are directly related to the physical properties of the medium. The 2017-time cube was used as the source database.

All the present-day seismic inversion techniques use momentum estimated from seismic data. The expected shape of the seismic pulse can significantly affect the result of seismic inversion and the subsequent assessment of the reservoir properties. The resulting pulse is used to estimate seismic reflection coefficients during the seismic inversion process [3]. Since the amount of well data was limited, a stable pulse was obtained based on a series of statistical pulses dependent on offsets (angles) extracted from the angle sums. When calculating the pulses for each angular sum, decreasing the amplitudes with distance (angle) was considered. In general, the obtained pulses allowed obtaining good correlation coefficients.

It is known that seismic data is characterized by limitations in frequency band, which leads to decreasing the seismic resolution of the record and quality, therefore, to limit the results of inversion outside the seismic frequency band, a low-frequency component is added to the data. To expand the frequency range, log data (longitudinal component of sonic logging), pre-stack time or depth migration rates, or regional gradient are used. First, the log curves are processed and edited to ensure an appropriate relationship between the impedance curves and the desired properties. Then the curves are converted to the time domain, filtered to fit the seismic frequency band, corrected for wellbore effects, balanced and quality classified.

Although many geological structures can have similar acoustic impedance characteristics, few geological formations have the same combination of acoustic and shear impedance properties to enhance interpretation. In this case,

the strategy is simple and formed by the experience of using inversion results in similar geological conditions: decreasing the longitudinal impedance within a homogeneous formation can correspond to improving the reservoir properties, and in the best case is a sign of hydrocarbon saturation.

In addition to acoustic impedance, shear impedance can be obtained by using the pre-stack seismic resolution inversion procedure. The inversion algorithm first estimates sequences of incident angle-dependent longitudinal wave reflection coefficients for the input partial sums. These are then used in the full Zoeppritz equation (or the Aki-Richards type approximation) to determine the reflection coefficients for non-zero angles over a limited frequency band [4]. These are then mixed with their low frequency counterparts taken from the model. The approximate result is then improved by performing a final inversion with respect to longitudinal impedance, transverse/shear impedance and density, subject to various constraints controlled by the interpreters. As a result of synchronous inversion, cubes of longitudinal and transverse impedances are obtained.

For the Lower Visayan reservoir, longitudinal impedance can be considered a good indicator, but the section contains coals that are characterized by lower values. Therefore, a more complicated parameter to calculate but at the same time more informative, is the V_p/V_s ratio (Figure 3). It should be noted that the superimposing between the properties of clays and sandstones is equal to the standard deviation, i.e. the superimposing is significant.

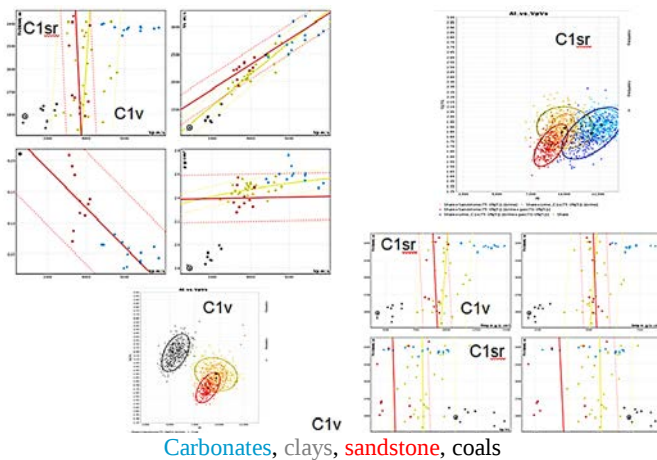


Figure 3. Result of analyzing elastic properties at the level of the Serpukhovian and the Lower Visayan reservoirs

As part of these studies, a neural machine learning procedure was carried out. The basic element of classical neural networks is the mathematical neuron [5-6], the formula of which can be expressed as a nonlinear transformation of a weighted sum of input signals using an activation function, as shown in equation (1):

$$y = f\left(\sum_{i=0}^n x_i w_i\right) \quad (1)$$

where n is the amount of neuron inputs, x_i is the value of the neuron input signals w_i is weight coefficients, $f()$ is the nonlinear activation function, y is the neuron output value.

A schematic representation of a classical neuron is presented in Figure 4, a.

The transformation function of input signals $f_i(x_i)$ is specified as a numerical construction in the form of a table (array) of pairs: the argument value is the function value.

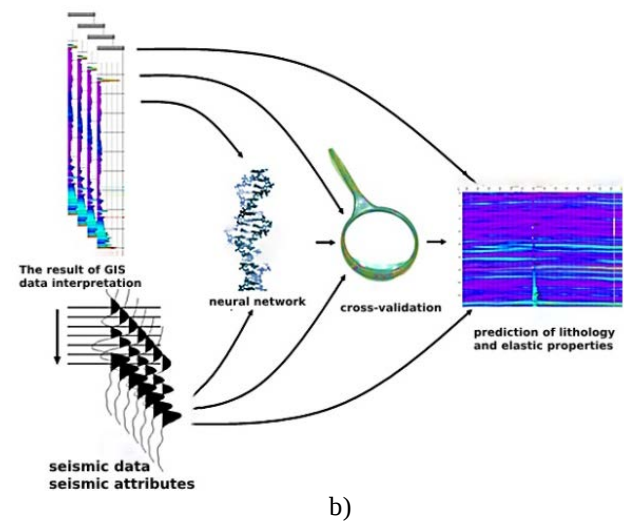
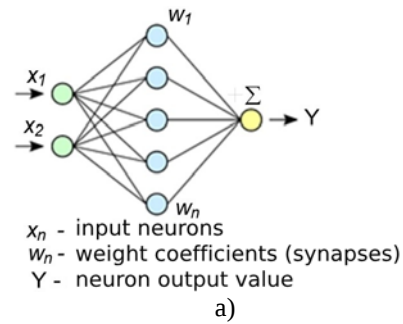


Figure 4. Explanations on the use of neural machine learning: a) schematic representation of a classical neuron; b) prediction of lithological and elastic properties using the Kolmogorov proprietary neural networks

To train such neural networks, the technology is used that has been developed on the basis of mathematical techniques set forth in the Kolmogorov theorem using hybrid stochastic optimization methods to increase the probability of finding the global minimum of the objective function.

The neural network learning scheme for predicting the target parameter is presented in Figure 4, b. For learning, an array of pairs is determined: a reference well-seismic field in a given window around the forecast point in the center of this window (Figure 4, a). Such an array is determined for each point located in the wellbore with known pore pressure values. The step along the wellbore should not be less than the measurement interval of the seismic cube. If the cube has a time scale, then the well must also be time referenced.

To predict lithological and elastic properties, one or more seismic cubes can be used in the form of total and angular sums or in the form of some attributes, including the results of inversion transformations [5-6]. For the studied interval of the Lower Carboniferous deposits, the cubes of porosity, longitudinal impedance, transverse impedance and their ratio were calculated (Figure 5). They were selected based on the results of petroelastic logging analysis, when it was concluded that the ratio of longitudinal and transverse impedances was related to saturation and conditionally to well production.

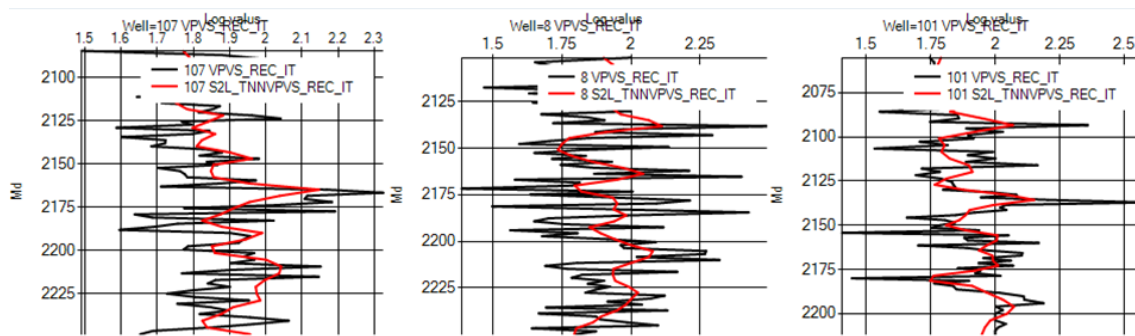
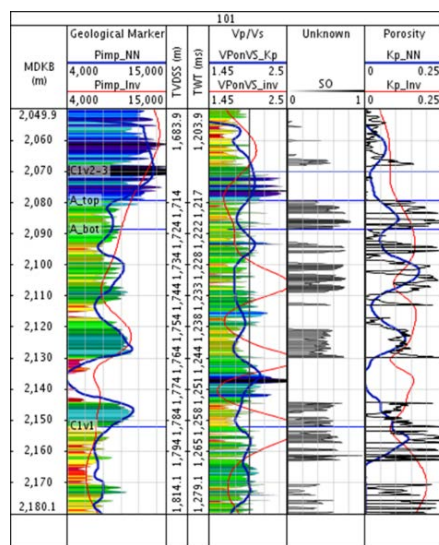
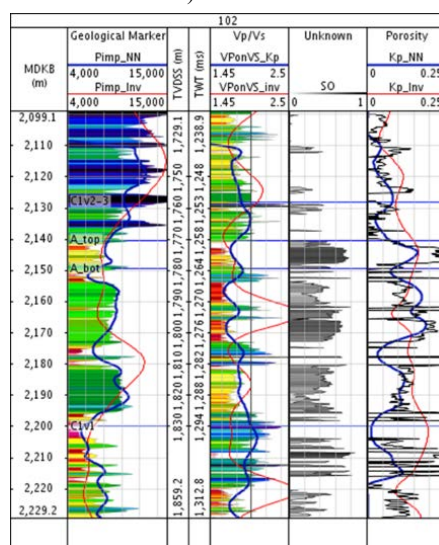


Figure 5. Examples of neural network learning results at well points. The Vp/Vs parameter

For the subsequent comprehensive analysis, a comparison was made of the target characteristics (petroelastic properties and porosity) calculated with the use of the synchronous inversion algorithm and neural network forecasting algorithms [7-8], on the basis of which it was found that the results of neural network learning have a number of advantages in terms of accuracy and resolution (Figure 6).



a) well 101



b) well 102

Figure 6. Comparing the PIMP, Vp/Vs and porosity parameters calculated by the PIMP, Vp/Vs and porosity parameters calculated by the synchronous inversion algorithm (red curve) and machine learning algorithms (blue curve) with real original logging curves

Thus, for the comprehensive analysis, the results of neural network learning were selected that not only had better convergence in the absolute values of logging curves but also had greater resolution (Figure 7, a-d).

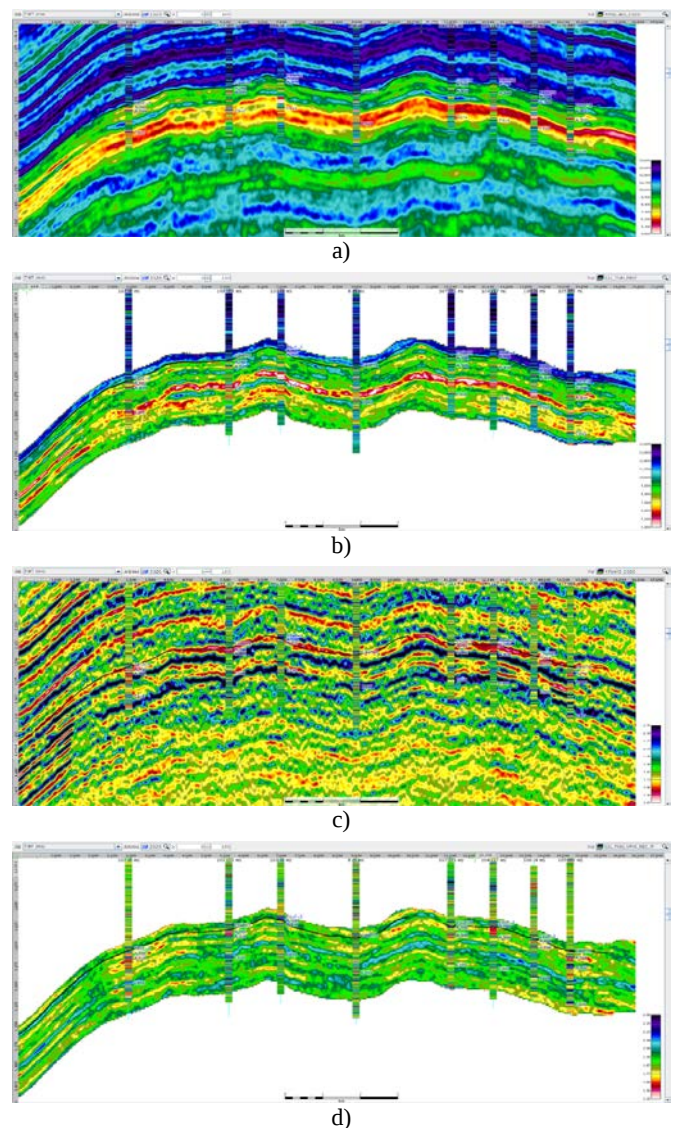


Figure 7. Summary sections along the line of wells: (a) – summary section of longitudinal impedance along the line of wells (pre-stack synchronous inversion algorithm); (b) – summary section of longitudinal impedance along the line of wells (neuron learning algorithm); (c) – summary section of the Vp/Vs ratio along the line of wells (synchronous inversion algorithm); (d) – summary section of the Vp/Vs ratio along the line of wells (neuron learning algorithm). In wells, color represents the ratio Vp/Vs

4. Conclusions

The studies carried out made it possible to identify a number of shortcomings in performing inversion forecast constructions in the process of comprehensive interpretation of seismic data and measurement data in wells. All of them are mainly associated with the presence of nonlinearity in the connection of the seismic field with the predicted parameters calculated in the wells.

1. A nonlinear distortion of the seismic signal associated with the complexity of the upper part of the section and the presence of distorting objects and factors (for example, salt structures, fault zones, steeply dipping structures, layers with increased absorption of seismic waves or with strong reflective properties, etc.).

2. The absence of theoretical developments on inversion constructions under conditions of nonlinear distortions in seismic fields.

3. The presence of complex nonlinear relationships between the distribution of seismic fields and elastic, filtration-capacitance and lithofacies parameters in wells.

Considering these effects of seismic nonlinearity in classical inversion technologies is the main factor in the better resolution of neural networks.

In addition, the proprietary technology used has the ability of neural network construction of a low-frequency model based on a structural model and well data. This construction is performed simultaneously with the use of seismic data to predict well data. This also greatly improves resolution compared to classical inversion, where the low-frequency model often accounts for 90% of the result.

References

- [1] Taskinbayev, K.M., Dzhangirov, A.N., Bogomazov, A.E., Zhaldaev, N.K., Ihsanova, N.K. & Sapaev, Zh.E. (2020). New vision of structure and oil and gas potential field Airakty. *Neft I gaz*, 6(120), 35-51. <https://doi.org/10.37878/2708-0080/2020-5.037>
- [2] Tleubergenova, A., Umirova, G.K., Karpenko, O. & Maussymbayeva, A. (2023). Geoelectrical model of the earth's crust along the Shu-Sarysu geotraverse according to magnetotelluric soundings. *Nauk. Visnyk Natsionalnoho Hirnychoho Universytetu*, (3), 5-10. <https://doi.org/10.33271/nvngu/2023-3/005>
- [3] Gunning, J., Glinsky, M.E. (2006). Wavelet extractor: A Bayesian well-tie and wavelet extraction program. *Computers and Geosciences*, 32 (5), 681-695. <https://doi.org/10.1016/j.cageo.2005.10.001>
- [4] Seismic inversion: Dictionaries and encyclopedias on Akademik. Retrieved from: <https://dic.academic.ru/dic.nsf/ruwiki/1332697> (accessed on: 24.01.2024)
- [5] Priezzhev I.I., Stanislav E. (2018). Application of machine learning algorithms using seismic data and well logs to predict reservoir properties. *80th EAGE Conference and Exhibition 2018*. <https://doi.org/10.3997/2214-4609.201800920>
- [6] Priezzhev, I. (2020). New age, Kolmogorov full functional neural network usage for nonlinear predictive seismic inversion. *Saint Petersburg 2020 - Geosciences: Converting Knowledge into Resources*
- [7] Ratov, B.T., Chudik, I.A., Fedorov, B.V., Sudakov, A.K. & Borash, B.R. (2023). Results of production tests of an experimental diamond crown during exploratory drilling in Kazakhstan. *SOCAR Proceedings*, (2), 023–029. <https://doi.org/10.5510/OGP20230200842>
- [8] Pavlychenko, A. V., Ihnatov, A. O., Koroviaka, Y. A., Ratov, B. T. & Zakenov, S. T. (2022). Problematics of the issues concerning development of energy-saving and environmentally efficient technologies of well construction. *IOP Conference Series: Earth and Environmental Science*, 1049(1), 012031. <https://doi.org/10.1088/1755-1315/1049/1/012031>

Сызықтық және сызықтық емес болжау алгоритмдеріне негізделген сейсмикалық деректер бойынша коллекторлардың қасиеттерін болжау технологиясын салыстырмалы талдау

А.Н. Джангиров¹, Г.К. Бекбалтина^{1*}, Г.К. Умирова², Р. Г. Темирханова², Ф.Н. Абдолдина²

¹Professional Geo Solutions Kazakhstan ЖШС, Алматы, Қазақстан

²Satbayev University, Алматы, Қазақстан

*Корреспонденция үшін автор: bekbaltinaqk@gmail.com

Андатпа. Мақалада каротаж деректерімен бірге МОГТ (жалпы тереңдік нүктесінің әдістемесі) 3D сейсмикалық деректерін динамикалық интерпретациялау нәтижелері қарастырылады. Авторлардың алдында Арықты газ конденсатты кен орны жағдайында нейрондық оқыту технологиясы мен жинақталғанға дейін сейсмикалық инверсия нәтижелерін салыстыру міндеті тұрды. Бұған зерттеу аймағының төмен сейсмикалық зерттелуі және аймақтың мұнай мен газдың болжамды перспективалары және динамикалық интерпретацияның белгілі бір процедурасын таңдау критерийлерін зерттеу қажеттілігі негіз болды. Осыған байланысты қазіргі уақытта геологиялық барлау саласында стандартты интерпретация графигі мен нейрондық машиналық оқыту шеңберінде белсенді қолданылатын жинақталғанға дейінгі инверсия арасындағы салыстырмалы талдау тұрғысынан Арықты газ конденсатты кен орнының құрылымы мен мұнай-газдылығын қарастыруға әрекет жасалды. Жүргізілген зерттеулердің өзектілігінің негіздемесі жаңа ұңғымалардың және заманауи каротаж деректерінің болуы, синхронды инверсия нәтижелерін жинақтауға дейін жаңарту және салыстыру мүмкіндігі, нейрондық оқыту алгоритмдерін сынақтан өткізу мүмкіндігі болып табылады. Жүргізілген зерттеулер Арықты кен орны жағдайында машиналық оқытуды басым пайдалану критерийлерін бөліп көрсетуге, киманың өнімді бөлігін құрайтын тау жыныстарының ішкі құрылымының ерекшеліктеріне жаңа көзқараспен қарауға, жинақталғанға дейін сейсмикалық инверсиямен салыстырғанда машиналық оқыту нәтижелерінің артықшылықтарын физикалық тұрғыдан көрсетуге мүмкіндік берді.

Негізгі сөздер: Арықты газ конденсатты кен орны, Шу-Сарысу шөгінді бассейні, динамикалық интерпретация, нейрондық желілер, жинақталғанға дейінгі сейсмикалық инверсия.

Сравнительный анализ технологии прогнозирования свойств коллекторов по сейсмическим данным на основе линейных и нелинейных алгоритмов предсказания

А.Н. Джангиров¹, Г.К. Бекбалтина^{1*}, Г.К. Умирова², Р.Г. Темирханова², Ф.Н. Абдолдина²

¹TOO Professional Geo Solutions Kazakhstan, Алматы, Казахстан

²Satbayev University, Алматы, Казахстан

*Автор для корреспонденции: bekbaltinagk@gmail.com

Аннотация. В статье рассматриваются результаты динамической интерпретации сейсмических данных МОГТ 3D в комплексе с каротажными данными. Перед авторами стояла задача сравнения результатов сейсмической инверсии до суммирования и технологии нейронного обучения в условиях газоконденсатного месторождения Арыкты. Основанием этому послужила и низкая сейсмическая изученность района исследований, и достаточно хорошие прогнозируемые перспективы нефтегазоносности региона, и необходимость изучения критериев выбора той или иной процедуры динамической интерпретации. В этой связи была предпринята попытка рассмотреть строение и нефтегазоносность газоконденсатного месторождения Арыкты с точки зрения сравнительного анализа между инверсией до суммирования, которая на данный момент в геологоразведочной отрасли активно используется в рамках стандартного графа интерпретации, и нейронного машинного обучения. Обоснованием актуальности выполненных исследований является наличие новых скважин и современных данных каротажа, возможность обновления и сравнения результатов синхронной инверсии до суммирования, возможность апробации алгоритмов нейронного обучения. Проведенные исследования позволили выделить критерии преимущественного использования машинного обучения в условиях месторождения Арыкты, по-новому взглянуть на особенности внутреннего строения пород, составляющих продуктивную часть разреза, физически показать преимущества результатов машинного обучения в сравнении с сейсмической инверсией до суммирования.

Ключевые слова: газоконденсатное месторождение Арыкты, Шу-Сарысуйский осадочный бассейн, динамическая интерпретация, нейронные сети, сейсмическая инверсия до суммирования.

Received: 11 June 2024

Accepted: 15 October 2024

Available online: 31 October 2024

Evaluation of the Influence of Geological and Technological Factors on the Recovery Factor of Low-Viscosity Oils from Carbonate Reservoirs

A.Kh. Agzamov¹, N.N. Sultonov^{1*}, E.I. Juraev¹, S.A. Agzamova²

¹Karshi engineering and economic institute, Karshi, Uzbekistan

²Tashkent State Technical University named after Islam Karimov, Tashkent, Uzbekistan

*Corresponding author: nodir.sultonov.90@gmail.com

Abstract. The geological structure of low-viscosity oil reservoirs, represented by carbonate collectors in the Ferghana region of Uzbekistan, is characterized by a wide range of variations in geological and physical factors as well as in the parameters of implemented development systems. Based on the refinement of parameters characterizing reservoir structure, geological heterogeneity, and the reservoir properties of productive layers, as well as the results of developing fields in the late stage of exploitation, a geological-statistical model has been developed using the method of multifactorial correlation and regression analysis. This model allows for the qualitative and quantitative assessment of the influence of geological and technological factors on the oil recovery factor for carbonate reservoirs in the Ferghana region. The study demonstrates the dominant influence of geological factors on the oil recovery factor, while among technological factors, only the well spacing density shows significant impact. The developed geological-statistical model for the oil recovery factor is recommended for use in justifying geological and technical measures to optimize the development systems of these fields.

Keywords: deposit, layer, factor, heterogeneity, viscosity, development, correlation, statistics, analysis, model, coefficient, recovery.

1. Введение

В настоящее время в целях повышения коэффициента извлечения геологических запасов нефти на месторождениях применяются различные геолого-технические мероприятия, направленные на увеличения дебитов скважин, темпов отбора нефти, снижению обводненности добываемой продукции. Эффективность проводимых геолого-технических мероприятий (ГТМ) в условиях широкого изменения геологического строения залежей, неоднородности продуктивных пластов, свойств пластовых флюидов и реализованных в них систем разработки различна. В этих условиях изучение и оценка степени влияния геологических и технологических факторов на коэффициент извлечения нефти (КИН) является одной из путей с обоснованного применения ГТМ и повышения их эффективности.

В мире особое внимание уделяется совершенствованию реализованных на длительно разрабатываемых месторождениях систем разработки, т.к. в настоящее время в среднем в продуктивных пластах остаются неизлеченными более 60% начальных геологических запасов. Особенно востребованными являются результаты исследований по обобщению опыта разработки длительно разрабатываемых месторождений. Результаты этих исследований позволяют установить причины высокой (низкой) эффективности разработки залежей и обосновать ГТМ по повышению КИН [1-5].

2. Материалы и методы

Геологическое строение месторождений Ферганского региона (ФР) Узбекистана, и особенности их разработки рассмотрены во многих работах. Подробнее описание параметров геолого-физических условий и реализованных систем разработки приведены в работах [6-12].

Однако мы сочли необходимым привести краткую характеристику геолого-физических условий и реализованных систем разработки месторождений ФР заключающейся в следующем.

В строении ФР участвуют неогеновые, палеогеновые, мезозойские (мел, юра) и палеозойские отложения. Общая толщина осадочного покрова в центральных частях впадины составляет более $10.0-12.0 \cdot 10^3$ м, в прибрежной $2.5-4.0 \cdot 10^3$ и более.

Характерная особенность распределения залежей углеводородов-значительное нарастание газоносности вниз по разрезу. Если отложения неогена и палеогена в основном нефтеносны, а скопления свободного газа связаны с газовыми шапками и единичными газовыми залежами, то в меловых и юрских отложениях развиты преимущественно газовые и газоконденсатные залежи.

В разрезе палеогена выделяется до восьми продуктивных пластов, из которых пласты V, VI, VII, VIII, IX представлены карбонатными породами (известняки и доломиты). Нефти палеогеновых отложений в основном легкие ($826-884 \text{ кг/м}^3$), малосернистые (0.05-0.75%), парафинистые (1.4-10.1%), высокосмолистые (силикаге-

левых смол 5.29-30.2). Вязкость пластовых нефтей небольшая – 1.2-6.6 мПа·с, начальная газонасыщенность от 2-5 до 100-150 м³/т.

Залежи нефти приурочены к узким асимметричным складкам, длина которых (10-15)·10³ м, ширина не превышает (2-3)·10³ м, углы падения пластов 20-30° и более. Известные залежи нефти и газа относятся в основном к пластово-сводовому типу. Однако в результате интенсивной тектонической деятельности по степени сложности их нарушениями среди них наблюдаются и тектонически экранированные залежи (Палванташское, Андижанское, Ходжабадское и др. месторождения). Литологические экранированные залежи в регионе распространены ограниченно.

Продуктивные отложения рассматриваемых объектов неоднородны, им присущи слоистая, зональная неоднородность и неравномерная трещиноватость.

Почти все месторождения многопластовые. Наибольшее число залежей открыто в разрезе Северо-Сохского, Южно-Аламышского, Андижанского и Палванташского месторождений. Залежи нефти характеризуются незначительной высотой, малой разницей между начальным пластовым давлением и давлением насыщения нефти газом.

При разработке исследуемых залежей нефти независимо от типа коллекторов, в связи с их небольшой глубиной сопоставимыми размерами (запасами нефти), были реализованы практически одинаковые системы разработки. Выделяются следующие особенности реализованных систем:

- разбуривание залежей относительно плотной сеткой скважин, размещенных по треугольной схеме;
- совместная эксплуатация залежей горизонтов V+VI, VII и VIII некоторых месторождений;
- эксплуатация залежей в начальный период на естественном режиме с последующим использованием различных систем заводнения (залежи с относительно небольшими запасами разрабатываются без поддержания пластового давления).

Из-за близких значений начального пластового давления нефтяных залежей и давления насыщения нефти газом, а также позднего применения заводнения, малой активности контурных вод, которые чаще всего существенного влияния на процесс разработки не оказывали, подавляющая часть нефтяных залежей дренировалась в начальной стадии разработки в режиме растворенного газа.

В настоящее время все рассматриваемые объекты находятся на четвертой стадии разработки, для которой характерны низкие темпы отбора нефти-менее 2.0% от начальных извлекаемых запасов, высокая обводненность добываемой продукции и значительное падение пластового давления, несмотря на реализацию мероприятий по его поддержанию и относительно низкие значения коэффициента извлечения нефти.

Достигнутые величины КИН в связи с нахождением объектов в завершающей стадии разработки (в части из них разработка уже приостановлена из-за полного обводнения добываемой продукции скважин) близки к своим конечным значениям. Поэтому достигнутые величины КИН нами рассматриваются как результат эффективности реализованной системы разработки, в частности эффективности метода заводнения.

В исследованиях по установлению управляющих КИН факторов широко используют методы построения статистических моделей, базирующихся на принципе «черного ящика» - модели, когда известны только входные и выходные переменные, а процесс их взаимодействия описывается простыми статистическими зависимостями. Основное допущение при статистическом моделировании заключается в том, что выходные переменные являются случайными величинами, подчиняющимися закону нормального распределения, вероятностный характер которых обусловлен случайными неконтролируемыми факторами [13-15].

В настоящее время для получения статистической модели широко используется метод многофакторного регрессионного анализа, который позволяет установить не только качественное, но и количественное влияние различных факторов на коэффициент извлечения нефти.

Для оценки статистической связи используют коэффициенты корреляции, которые вычисляют по формуле:

$$r_{xy} = \frac{1}{(N-1)G_x G_y} \sum_{i=1}^N (x_i - \bar{x})(y_i - \bar{y}), \quad (1)$$

где r_{xy} - коэффициент корреляции между показателями процесса и одним из факторов;

$\bar{x}$ и $\bar{y}$ - математические ожидания;

G_x и G_y - дисперсии, вычисляемые по формулам:

$$G_x^2 = \frac{1}{(N-1)} \sum_{i=1}^N (x_i - \bar{x})^2, \quad (2)$$

$$G_y^2 = \frac{1}{(N-1)} \sum_{i=1}^N (y_i - \bar{y})^2. \quad (3)$$

Достоверность коэффициента корреляции оценивается критерием надежности

$$O_r = \frac{|r_{xy}|}{\sqrt{N}}, \quad (4)$$

где $\sqrt{N}$ - среднее квадратичное отклонение коэффициента корреляции

$$G_r = \frac{1 - r_{xy}^2}{\sqrt{N}}. \quad (5)$$

При критерии $G_r > 2.6$ с вероятностью 0.95 можно утверждать возможность существования линейной корреляционной связи между анализируемыми параметрами. Коэффициенты корреляции позволяют оценить меру линейной статистической связи между показателями и факторами, а также между самими факторами. Результаты корреляционного анализа являются исходным материалом для построения эмпирических формул, называемых в статистике уравнениями регрессии или математическими моделями.

Линейное уравнение регрессии имеет вид:

$$y = a_0 + a_1 x_1 + a_2 x_2 + a_3 x_3 + \dots + a_n x_n \quad (6)$$

где $a_0, a_1, a_2, a_3, \dots, a_n$ - коэффициенты уравнения регрессии, определяемые из решения системы уравнений

$$\sigma_{y r_{x_1}} = a_1 \sigma_{x_1} + a_2 r_{x_1 x_2} \sigma_{x_2} + \dots + a_n r_{x_1 x_n} \sigma_{x_n}$$

$$\sigma_{y r_{x_2}} = a_1 r_{x_2} + a_2 \sigma_{x_2} + \dots + a_n r_{x_2 x_n} \sigma_{x_n}$$

$$\sigma_{y r_{x_n}} = a_1 r_{x_n x_1} \sigma_{x_1} + a_2 r_{x_n x_2} \sigma_{x_2} + \dots + a_n \sigma_{x_n} \quad (7)$$

а коэффициент

$$a_0 = \bar{y} - \sum_{i=1}^n a_i \bar{x}_i, \quad (8)$$

С использованием метода многофакторного регрессионного анализа решаются следующие задачи:

- выявление факторов, характеризующих геологические условия и параметры пласта, оказывающие основное влияние на КИН;

- оценка степени влияния выявленных факторов, как дифференцированно-каждого в отдельности, так и интегрально - в совокупности;

- определение оптимальных и граничных значений факторов;

- обоснование геолого-технических мероприятий по увеличению КИН с учетом геолого-физических условий залежей и текущего состояния разработки объектов.

При этом качестве объектов исследования должны быть выбраны нефтяные залежи, которые характеризуются следующими условиями (таблица 1):

- находится в поздней стадии разработки;
- отличается широким диапазоном изменения геолого-физических показателей;
- имеет некоторые отличия в элементах технологии, несмотря на единый подход и общие принципы разработки;
- имеет представительный геолого-промысловый материал;
- приурочены к различным стратиграфическим подразделениям.

Таблица 1. Геолого- промысловые факторы, использованные для получения геолого-статистической модели КИН объектов, представленных карбонатными коллекторами с маловязкой нефтью

№	Месторождение	Продуктивный горизонт	Проницаемость, мкм ²	Вязкость нефти в пластовых условиях, мПа·с	Коэффициент песчанистости, доли ед.	Плотность сетки скважин, га/скв	Средний Темп отбора жидкости, %	Компенсация отбора жидкости закачкой воды, доли ед.	Коэффициент извлечения нефти, доли ед.
1	Ходжабад	VII	0.16	2.05	0.48	3.2	2.88	1.153	0.375
2	Западный Палванташ	V+VI	0.061	2.7	0.35	4.7	1.65	2.161	0.277
3	Андижан	VIII	0.05	3.2	0.4	4.3	4.68	0.82	0.274
4	Андижан	V	0.352	1.2	0.64	2.1	3.81	0.743	0.623
5	Южный Аламышик	V+VI	0.293	2.35	0.53	3.9	0.96	3.011	0.418
6	Южный Аламышик	VIII	0.393	1.4	0.69	2	1.24	3.011	0.69
7	Хартум	VIII	0.061	4.2	0.42	7.8	1.41	0	0.176
8	Палванташ	VII	0.35	1.3	0.62	1.1	2.27	0.9	0.662
9	Палванташ	VIII	0.38	1.2	1	1.3	5.72	0.9	0.687
10	Андижан	VIII	0.35	1.2	1	1.7	4.18	0.82	0.62
11	Восточный аввал	V+VI	0.13	3	0.35	5	0.9	0	0.289
12	Хартум	VI	0.15	2.7	0.32	4.4	0.98	0	0.391
13	Восточный Хартум	VI	0.03	4.7	0.32	5.7	2.48	0	0.177
14	Тергачи	V	0.017	6.6	0.25	18	0.19	0	0.08
15	Наманган	V	0.03	4.2	0.4	14	1.06	0	0.209
16	Ходжабад	V	0.05	4.8	0.4	4.8	0.79	0.575	0.2
17	Северный сох	VIII	0.16	4.66	0.53	3.7	2.93	1.159	0.422
18	Аввал	V+VI	0.05	5.5	0.44	4.2	1.31	0	0.234
19	Западный Палванташ	VIII+IX	0.16	2.6	0.68	3.5	3.07	0.966	0.475
20	Палванташ	V+VI	0.16	2	0.64	2	1.99	1.026	0.476
21	Ходжабад	VII	0.135	2	0.57	2.1	2.11	1.564	0.476

3. Результаты и обсуждение

По результатам расчетов исходных геолого-промысловых данных (таблица 1), по вышеприведенному алгоритму, составлена корреляционная матрица в приведенная в таблице 2. Как видно из таблицы 2 КИН имеет достаточно высокие корреляционные связи с

фильтрационно-емкостными свойствами коллекторов (К-0.7445), неоднородностью продуктивных пластов (К_п-0.8437) и вязкостью пластовой нефти (μ_н-0.8693), а из технологических факторов только с плотностью сетки скважин (S-0.7199).

Таблица 2. Корреляционная матрица

Факторы и показатели	Коэффициенты корреляции							Средние значения	Дисперсия
	КИН	К	μ _н	К _п	S	T _ж	K _к		
КИН	1	0.7445	-0.8693	0.8437	-0.7199	0.5337	0.2373	0.392	0.1871
К	0.7445	1	0	0	0	0	0	0.167	0.1304
μ _н	-0.8693	0	1	0	0	0	0	3.0	1.5784
K _п	0.8437	0	0	1	0	0	0	0.52	0.2037
S	-0.7199	0	0	0	1	0		4.7	4.1324
T _ж	0.5337	0	0	0	0	1	0	2.22	1.4425
K _к	0.2373	0	0	0	0	0	1	0.895	0.9194

По данным таблицы 2 составлена система уравнений (6) и (7), из которых определены коэффициенты статистической модели:

$$a_0=0.0759; a_1=1.0683; a_2=-0.1031; a_3=0.7752; a_4=-0.0326; a_5=0.0693; a_6=0.0483.$$

Геолого-статистическая модель КИН для объектов ФР Узбекистана, представленных карбонатными коллекторами, описывается следующим многофакторным уравнением:

$$\text{КИН}=0.0759+1.0683 \cdot K-0.1031 \mu_n+1.7752 \cdot K_n-0.0326 \cdot S+0.0693 \cdot T_{\text{ж}}+0.0483 \cdot K_{\text{к}}$$

Необходимо отметить, что ранее в работах [16-17] по результатам многофакторного корреляционного анализа были получены следующие уравнения:

$$\text{КИН}=0.2001+0.6062 \cdot T_n-0.1749 \cdot S+0.0977 K_n+0.0593 \cdot h_n+0.5433 \cdot K-0.2751 \mu_n \quad (9)$$

$$\text{КИН}=0.1748+0.0694 \cdot T_{\text{ж}}-0.0137 \cdot S+0.2902 \cdot K-0.015 \cdot \mu_n+0.2548 \cdot K_n \quad (10)$$

где T_n – темп отбора нефти в процентах от начальных извлекаемых запасов;

h_n – эффективная нефтенасыщенная толщина пласта.

Геолого-статистические модели (9) и (10) не получили широкого применения, т.к. T_n зависит от проектной величины КИН и при сопоставимых геологических запасах приводит к непостоянным значениям, а в уравнении (10) нет параметра характеризующей системы заводнения.

Численные эксперименты проведенной по созданной геолого-статистической модели КИН (8) показывает, что в зависимости от сочетания входящих в него факторов, имитирующее различные геолого-физические условия и системы разработки величина КИН изменяется в больших пределах от 0.1 до 0.8, что подтверждается фактическими данными длительно эксплуатируемых объектов ФР, представленных карбонатными коллекторами.

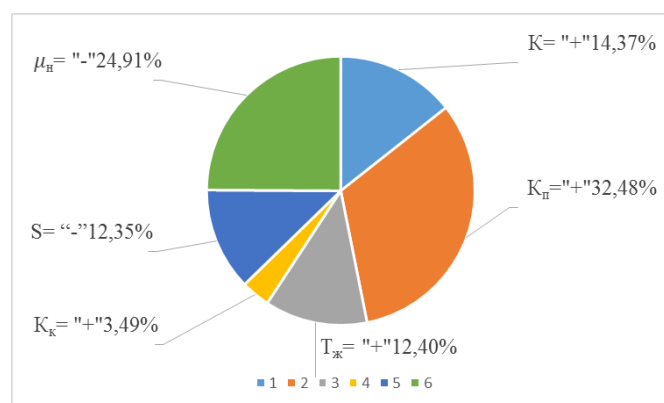


Рисунок 1. Доля влияния геолого-физических и технологических факторов на величину коэффициента извлечения нефти: K – средняя проницаемость; μ_n – вязкость пластовой нефти; K_n – коэффициент песчаности; S – плотность сетки скважин; $T_{\text{ж}}$ – средний темп отбора жидкости; $K_{\text{к}}$ – компенсация отбора жидкости закачкой воды; «+» – факторы, увеличивающие КИН; «-» – факторы, снижающие КИН

Оценка доли влияния геологических и технологических факторов на величину КИН, рассчитанных для их

средних значений показателей показывает, что эффективность разработки объектов представленных карбонатными коллекторами во многом зависит от геолого-физических условий-71.76%, при этом подавляющим является влияния геологической неоднородности продуктивных пластов-32.48% (рисунок 1).

Из технологических факторов наиболее весомым является влияние на КИН плотности сетки скважин-12.35%. Низкие величины влияния на КИН компенсации отбора жидкости закачкой воды и темпа отбора жидкости подтверждает результаты анализа эффективности заводнения. На объектах анализа применение заводнения на поздней стадии разработки оказалось малоэффективной и поэтому основным направлением повышения КИН должны быть мероприятия по уплотнению плотности сетки скважин.

References / Литература

- [1] Agzamov, A.Kh., Ermatov, N.Kh., Bobomurodov, U.Z. & Sakhatov, B.G. (2020). Determination of the Density Limit of the Grid Density of Wells in the Late Stage of Development of Oil Deposits. *International Journal of Advanced Research in Science, Engineering and Technology*, 7(2), 12837-12842
- [2] Ermatov, N.Kh., Turdiev, Sh.Sh., Raxmukulov, M.T., Jo'rayev, E.I. & Sakhatov, B.G. (2021). An Overview of the Results of Field Studies of the Effect of Lowering the Bottom hole Pressure below the Saturation Pressure of Oil with Gas on the Productivity of Wells. *International Journal of Advanced Research in Science, Engineering and Technology*, 8(5), 17453-17458
- [3] Agzamov, A.H., Karshiyev, A.H., Jurayev, E.J. & Sakhatov, B.G. (2021). On the Impact of Water Flooding on The Coefficients of Washing and Oil Recovery From productive Formation Of The Fergana Oil and Gas region, Represented By Carbonate Reservoirs. *The American Journal of Engineering and Technology*, 5(705), 17-30
- [4] Karshiev, A., Razzakov, O., Sakhatov, B. & Sultanov, N. (2023). Effectiveness of compaction of the initial well grid in the late stage of oil and gas field development. *E3S Web of conferences* 434, 01040. <http://doi.org/10.1051/e3sconf/202343401040>
- [5] Ermatov, N.Kh., Mukhammadiev, Kh.M., Khamroyev, B.Sh. & Zhuraeva, Y.Sh. (2021). Influenc of Geological Factors on the Formation of the Value of Oil Recovery in Different Geological and Physical Conditions. *International Journal of Advanced Research in Science, Engineering and Technology*, 8(2), 16745-16749
- [6] Agzamov, A. Kh., Karshiyev, A.Kh., Sakhatov, B.G. & Jurayev, E.I. (2021). About the degree of flooding influence on the coefficients of oil washing and extraction from the productive layers in the Fergana oil and gas region, represented by carbonate reservoirs. *Technical science and innovation*, 4(10), 112-128
- [7] Ermatov, N.Kh. (2020). Issledovanie geologo-fizicheskikh i tehnologicheskikh faktorov, opredelajushhih jeffektivnost' zavodnenija neftjanyh zalezhej plastovogo tipa. *Tashkent*
- [8] Maxmudov, N.N., Ermatov, N.Kh., Agzamov, A.Kh. & Turdiyev, Sh.Sh. (2019). Peculiarities of Water Supply of Gas Wells in Massive Type Oil Reservoirs. *Energy and Environment Research*, (1), 18-22. <https://doi.org/10.5539/er.v9n1p18>
- [9] Mahmudov, N.N., Agzamov, A.H., Agzamov, A.A. & Ermatov, N.H. (2019). Rezultaty ocenki fil'tracionno-emkostnyh svojstv kollektorov glubokozalezajushhih produktivnyh gorizontov Ferganskoj vpadiyny. *Neftpromylovoe delo*, (3), 37-39
- [10] Agzamov, A.H., Ermatov, N.H., Agzamov, A.A. & Muhammadiev, H.M. (2020). O stepeni vlijaniya kratnosti promyvki plasta na koeficient izvlecheniya nefti zalezhej Ferganskoj

- neftegazonosnoj oblasti, predstavlenykh karbonatnymi porodami. Geologiya, geofizika i razrabotka neftjanyh i gazovyh mestorozhdenij. M.: VNIIOJeNG
- [11] Agzamov, A.Kh., Ermatov, N.Kh., Agzamov, A.A. & Normatov, B.R. (2020). Distribution and State of Operation of Reserves of oil Deposits of Productive Sediments of the Fergana Oil and Gas-Bearing Region. *International Journal of Advanced Research in Science, Engineering and Technology*, 7(1), 12384-12389
- [12] Agzamov, A.Kh., Ermatov, N.Kh., Normatov, B.R. Ashirov, V.R. & Rahmonqulov, M.T. (2020). On the Degree of Influence of the Formation Washing Ratio on The Oil Recovery Coefficient of The Deposits of The Fergana Oil and Gas Region Represented by Terrigenous Rocks. *International Journal of Advanced Research in Science, Engineering and Technology*, 7(2), 12734-12743
- [13] Loginova, M.Ye., Chetvertnova, J.A., Shammazov, A.M., Movsumzade, E.M. & Tivas, N.S. (2023). Optimization of concentrations of drilling reagents based on gums using mathematical modeling methods. *Petroleum Engineering*, 21(1), 6-14. <https://doi.org/10.17122/ngdelo-2023-1-6-14>
- [14] Zemtcov, Ju.V., Ustjugov, A.S. (2016). Mnogofaktornyj analiz jeffektivnosti ogranichenija vodopritokov v razlichnyh geologo-fizicheskix uslovijah skvazhin i plastov. *Neftepromyslovoe delo*, (5), 20-27
- [15] Grechin, E., Ovchinnikov, V., Atrasev, S. & Kamenskij, A. (2006). Primenenie metodov matematicheskoy statistiki k analizu promyslovyyh dannyh. *Burenje i neft'*, (7-8), 14-15
- [16] Irmatov, Je.K., Agzamov, A.H. & Ibragimov, M.H. (1992). Nefteotdacha mestorozhdenij mezhgornyyh vpadin Sredney Azii s oslozhnennymi geologo-fizicheskimi uslovijami i puti ee uvelicheniya. *Tashkent: AN RUz, NPO «Kibernetika»*
- [17] Hajitov, O.G., Agzamova, S.A. (2014). Prognoz konechnogo koeficienta nefteizvlecheniya neftjanyh zalezhey s malymi zapasami na osnove statisticheskix modelej. *Izvestiya vuzov. Gornyy zhurnal*, (7), 39-43

Карбонатты коллекторлардағы төмен тұтқырлы мұнайды алу коэффициентіне геологиялық және технологиялық факторлардың әсерін бағалау

А.Х. Агзамов¹, Н.Н. Султонов^{1*}, Э.И. Жураев¹, С.А. Агзамова²

¹Қаршы инженерлік-экономикалық институты, Қаршы, Өзбекістан

²Ислам Каримов атындағы Ташкент мемлекеттік техникалық университеті, Ташкент, Өзбекістан

*Корреспонденция үшін автор: nodir.sultonov.90@gmail.com

Андатпа. Өзбекстанның Ферғана аймағында карбонатты коллекторлармен ұсынылған төмен тұтқырлы мұнай кен орындарының геологиялық құрылымы геологиялық-физикалық факторлардың және жүзеге асырылған игеру жүйелерінің параметрлерінің кең ауқымымен сипатталады. Қабаттардың құрылымын, геологиялық әртектілігін және өнімді қабаттардың коллекторлық қасиеттерін сипаттайтын параметрлерді нақтылау, сондай-ақ игеру нәтижелерін (кешенді пайдалану кезеңіндегі) талдау негізінде көпфакторлы корреляциялық және регрессиялық талдау әдісін қолдана отырып, геологиялық-статистикалық модель жасалды. Бұл модель геологиялық және технологиялық факторлардың карбонатты жыныстардан тұратын Ферғана аймағының мұнай алу коэффициентіне сапалық және сандық әсерін анықтауға мүмкіндік береді. Зерттеу нәтижелері мұнай алу коэффициентіне геологиялық факторлардың басым әсерін көрсетсе, технологиялық факторлардың ішінде ұңғымалардың орналасу тығыздығы ғана елеулі әсерге ие екенін анықтады. Алынған мұнай алу коэффициентінің геологиялық-статистикалық моделін кен орындарын игеру жүйелерін жетілдіруге арналған геологиялық-техникалық шараларды негіздеу үшін қолдану ұсынылады.

Негізгі сөздер: кен орны, қабат, фактор, біртектіліксіздік, тұтқырлық, игеру, корреляция, статистика, талдау, модель, коэффициент, алу.

Оценка степени влияния геологических и технологических факторов на величину коэффициента извлечения маловязких нефтей из объектов с карбонатными коллекторами

А.Х. Агзамов¹, Н.Н. Султонов^{1*}, Э.И. Жураев¹, С.А. Агзамова²

¹Қаршинский инженерно – экономический институт, Қарши, Узбекистан

²Ташкентский государственный технический университет им. И.Каримова, Ташкент, Узбекистан

*Автор для корреспонденции: nodir.sultonov.90@gmail.com

Аннотация. Приведены особенности геологического строения объектов маловязких нефтей, представленных карбонатными коллекторами, Ферганского региона Узбекистана, характеризующихся широким диапазоном изменения геолого-физических факторов и параметров реализованных систем разработки. На основе уточнения параметров характеризующих строения залежей, геологической неоднородности и коллекторских свойств продуктивных пластов, а также результатов разработки объектов, находящихся в поздней стадии эксплуатации. С применением метода многофакторного корреляционного и регрессионного анализа создано геолого-статистическая модель, позволяющее устано-

вит качественное и количественное влияние геологических и технологических факторов на коэффициент извлечения нефти из объектов Ферганского региона Узбекистана, представленных карбонатными породами. Показано, подавляющее влияние геологических факторов на коэффициент извлечения нефти, а из технологических только существенное влияние плотности сетки скважин. Полученная геолого-статистическая модель коэффициента извлечения нефти рекомендовано использовать при обосновании геолого-технических мероприятий по совершенствованию реализованных систем разработки объектов.

Ключевые слова: месторождение, пласт, фактор, неоднородность, вязкость, разработка, корреляция, статистика, анализ, модель, коэффициент, извлечения.

Received: 13 June 2024

Accepted: 15 October 2024

Available online: 31 October 2024

CONTENTS

<i>Mamyrbayeva K.K., Kuandykova A.N., Chepushtanova T.A., Merkitabeyev Y.S., Brajendra M.</i> STUDIES OF THE EXTRACTION OF NICKEL AND COBALT FROM MAGNETIC ENRICHMENT TAILINGS.....	1
<i>Gladyshev S.V., Dyussenova S.B., Bakhshyan A.I., Imangaliyeva L.M., Abikak Ye.B.</i> HYDROCHEMICAL PROCESSING OF FINE KAOLINITE FRACTION OF HIGH- SILICEOUS BAUXITE WITH PRELIMINARY CHEMICAL ACTIVATION.....	10
<i>Tolubaev K., Zhautikov B., Zobnin N., Dairbekova G., Kabieva S., Riad-Taha Al-Kasasbeh</i> ELECTRON MICROSCOPY OF NON-MONOCRYSTALLINE MAGNETRON SPUTTERED SILICON THIN FILMS CONTAINING FIBROUS NANOSILICON.....	18
<i>Bektay E., Turysbekova G., Shiderin B., Bektayev M.</i> INDUSTRIAL APPLICATION OF BACTERIAL IRON OXIDATION IN IN-SITU LEACHING TECHNOLOGIES FOR URANIUM.....	25
<i>Baishashov B.U., Nigmatova S.A., Seidali A.L., Madiyarova I.T., Spenser G. Lucas</i> PALEO GEOGRAPHICAL RECONSTRUCTION OF THE LATE NEOGENE IN THE NORTH- EASTERN PART OF CENTRAL KAZAKHSTAN (THE «GOOSE PASSAGE» SITE).....	32
<i>Onglassynov Zh.A., Shagarova L.V., Muratova M.M.</i> ASSESSMENT OF SPECTRAL INDICES VARIATIONS IN AREAS WITH FAVOURABLE HYDROMELIORATIVE CONDITIONS OF THE MAKTAARAL IRRIGATION MASSIF.....	45
<i>Dzhangirov A.N., Bekbaltina G.K., Umirova G.K., Temirkhanova R.G., Abdoldina F.N.</i> COMPARATIVE ANALYZING THE TECHNOLOGY OF PREDICTING RESERVOIR PROPERTIES ACCORDING TO SEISMIC DATA BASED ON LINEAR AND NONLINEAR PREDICTION ALGORITHMS.....	54
<i>Agzamov A.Kh., Sultonov N.N., Juraev E.I., Agzamova S.A.</i> EVALUATION OF THE INFLUENCE OF GEOLOGICAL AND TECHNOLOGICAL FACTORS ON THE RECOVERY FACTOR OF LOW-VISCOSITY OILS FROM CARBONATE RESERVOIRS.....	61

МАЗМҰНЫ

<i>Мамырбаева К.К., Куандыкова А.Н., Чепуштанова Т.А., Меркибаев Е.С., Бражендра М.</i> МАГНИТТІ БАЙЫТУ ҚАЛДЫҚТАРЫНАН НИКЕЛЬ МЕН КОБАЛЬТТЫ БӨЛІП АЛУДЫ ЗЕРТТЕУ.....	1
<i>Гладышев С.В., Дюсенова С.Б., Бахшян А.И., Имангалиева Л.М., Абиқақ Е.Б.</i> АЛДЫН АЛА ХИМИЯЛЫҚ БЕЛСЕНДІРІЛГЕН ЖОҒАРЫ КРЕМНИЙЛІ БОКСИТТІҢ ҰСАҚ ДИСПЕРСТІ КАОЛИНИТ ФРАКЦИЯСЫН ГИДРОХИМИЯЛЫҚ ӨНДЕУ.....	10
<i>Толубаев Қ., Жаутиков Б., Зобнин Н., Даирбекова Г., Кабиева С., Риад-Таха Ал-Касахбех</i> ТАЛШЫҚТЫ НАНО КРЕМНИЙ БАР МАГНЕТРОНДЫ ШАШЫРАТЫЛҒАН МОНОКРИСТАЛДЫ ЕМЕС КРЕМНИЙЛІ ЖҰҚА ҚАБЫҚШАЛАРДЫҢ ЭЛЕКТРОНДЫ МИКРОСКОПИЯСЫ.....	18
<i>Бектай Е., Турысбекова Г., Шидерин Б., Бектаев М.</i> УРАНДЫ ЖЕРАСТЫ ШАЙМАЛАУ ТЕХНОЛОГИЯЛАРЫНДА ТЕМІРДІҢ БАКТЕРИЯЛЫҚ ТОТЫҒУЫН ӨНЕРКӘСІПТІК ҚОЛДАНУ.....	25
<i>Баишашов Б.У., Нигматова С.А., Сейдалы А.Л., Мадиярова И.Т., Спенсер Лукас</i> ОРТАЛЫҚ ҚАЗАҚСТАННЫҢ СОЛТҮСТІК-ШЫҒЫС БӨЛІГІНДЕГІ (ҚАЗҒҰШ ӨТКЕЛІ АЙМАҒЫ) СОҢҒЫ НЕОГЕН ДӘУІРІНІҢ ПАЛЕОГЕОГРАФИЯЛЫҚ РЕКОНСТРУКЦИЯСЫ.....	32
<i>Оңласынов Ж.Ә., Шагарова Л.В., Муратова М.М.</i> МАҚТААРАЛ СУАРУ МАССИВІНІҢ ГИДРОМЕЛИОРАТИВТІК ЖАҒДАЙЫНЫҢ ҚОЛАЙЛЫ АЙМАҚТАРДАҒЫ СПЕКТРЛІК КӨРСЕТКІШТЕРДІҢ ӨЗГЕРУІН БАҒАЛАУ Джангиров А.Н., Бекбалтина Г.К., Умирова Г.К., Темирханова Р. Г., Абдолдина Ф.Н. СЫЗЫҚТЫҚ ЖӘНЕ СЫЗЫҚТЫҚ ЕМЕС БОЛЖАУ АЛГОРИТМДЕРІНЕ НЕГІЗДЕЛГЕН СЕЙСМИКАЛЫҚ ДЕРЕКТЕР БОЙЫНША КОЛЛЕКТОРЛАРДЫҢ ҚАСИЕТТЕРІН БОЛЖАУ ТЕХНОЛОГИЯСЫН САЛЫСТЫРМАЛЫ ТАЛДАУ.....	45 54

Агзамов А.Х., Султонов Н.Н., Жураев Э.И., Агзамова С.А.

КАРБОНАТТЫ КОЛЛЕКТОРЛАРДАҒЫ ТӨМЕН ТҮТҚЫРЛЫ МҰНАЙДЫ АЛУ КОЭФФИЦИЕНТІНЕ ГЕОЛОГИЯЛЫҚ ЖӘНЕ ТЕХНОЛОГИЯЛЫҚ ФАКТОРЛАРДЫҢ ӘСЕРІН БАҒАЛАУ.....	61
---	----

СОДЕРЖАНИЕ

Мамырбаева К.К., Куандыкова А.Н., Чепуштанова Т.А., Меркибаев Е.С., Бражендра М. ИССЛЕДОВАНИЕ ИЗВЛЕЧЕНИЯ НИКЕЛЯ И КОБАЛЬТА ИЗ ХВОСТОВ МАГНИТНОГО ОБОГАЩЕНИЯ.....	1
Гладышев С.В., Дюсенова С.Б., Бахтиян А.И., Имангалиева Л.М., Абиак Е.Б. ГИДРОХИМИЧЕСКАЯ ПЕРЕРАБОТКА МЕЛКОДИСПЕРСНОЙ КАОЛИНИТОВОЙ ФРАКЦИИ ВЫСОКОКРЕМНИСТОГО БОКСИТА С ПРЕДВАРИТЕЛЬНОЙ ХИМИЧЕСКОЙ АКТИВАЦИЕЙ.....	10
Толубаев К., Жаутиков Б., Зобнин Н., Даирбекова Г., Кабиева С., Риад-Таха Ал-Касахбех ЭЛЕКТРОННАЯ МИКРОСКОПИЯ НЕ МОНОКРИСТАЛЛИЧЕСКИХ ТОНКИХ КРЕМНИЕВЫХ ПЛЁНОК МАГНЕТРОННОГО НАПЫЛЕНИЯ, СОДЕРЖАЩИХ ВОЛОКНИСТЫЙ НАНОКРЕМНИЙ.....	18
Бектай Е., Турысбекова Г., Шидерин Б., Бектаев М. ПРОМЫШЛЕННОЕ ИСПОЛЬЗОВАНИЕ БАКТЕРИАЛЬНОГО ОКИСЛЕНИЯ ЖЕЛЕЗА В ТЕХНОЛОГИЯХ ПОДЗЕМНОГО ВЫЩЕЛАЧИВАНИЯ УРАНА.....	25
Баишапов Б.У., Нигматова С.А., Сейдалы А.Л., Мадиярова И.Т., Сенсер Лукас ПАЛЕОГЕОГРАФИЧЕСКАЯ РЕКОНСТРУКЦИЯ ПОЗДНЕГО НЕОГЕНА В СЕВЕРО- ВОСТОЧНОЙ ЧАСТИ ЦЕНТРАЛЬНОГО КАЗАХСТАНА (МЕСТО «ГУСИНЫЙ ПЕРЕХОД».).....	32
Оңласынов Ж.А., Шагарова Л.В., Муратова М.М. ОЦЕНКА ВАРИАЦИЙ СПЕКТРАЛЬНЫХ ИНДЕКСОВ НА УЧАСТКАХ С БЛАГОПРИЯТНЫМИ ГИДРОМЕЛИОРАТИВНЫМИ УСЛОВИЯМИ МАКТААРАЛЬСКОГО МАССИВА ОРОШЕНИЯ.....	45
Джангиров А.Н., Бекбалтина Г.К., Умирова Г.К., Темирханова Р.Г., Абдолдина Ф.Н. СРАВНИТЕЛЬНЫЙ АНАЛИЗ ТЕХНОЛОГИИ ПРОГНОЗИРОВАНИЯ СВОЙСТВ КОЛЛЕКТОРОВ ПО СЕЙСМИЧЕСКИМ ДАННЫМ НА ОСНОВЕ ЛИНЕЙНЫХ И НЕЛИНЕЙНЫХ АЛГОРИТМОВ ПРЕДСКАЗАНИЯ.....	54
Агзамов А.Х., Султонов Н.Н., Жураев Э.И., Агзамова С.А. ОЦЕНКА СТЕПЕНИ ВЛИЯНИЯ ГЕОЛОГИЧЕСКИХ И ТЕХНОЛОГИЧЕСКИХ ФАКТОРОВ НА ВЕЛИЧИНУ КОЭФФИЦИЕНТА ИЗВЛЕЧЕНИЯ МАЛОВЯЗКИХ НЕФТЕЙ ИЗ ОБЪЕКТОВ С КАРБОНАТНЫМИ КОЛЛЕКТОРАМИ.....	61

Учредитель: Satbayev University

Регистрация:

Министерство информации и общественного развития Республики Казахстан
№ KZ19VPY00056529 от 30.09.2022

Официальный сайт: <https://vestnik.satbayev.university/index.php/journal/>

Основан в августе 1994 г. Выходит 6 раз в год

Адрес редакции:

г. Алматы, ул. Сатпаева,
22 тел.: 292-63-46