

ҚАЗАҚСТАН РЕСПУБЛИКАСЫНЫҢ ҒЫЛЫМ ЖӘНЕ ЖОҒАРЫ БІЛІМ МИНИСТРЛІГІ
МИНИСТЕРСТВО НАУКИ И ВЫСШЕГО ОБРАЗОВАНИЯ РЕСПУБЛИКИ КАЗАХСТАН
MINISTRY OF SCIENCE AND HIGHER EDUCATION OF THE REPUBLIC OF KAZAKHSTAN



**ХАЛЫҚАРАЛЫҚ АҚПАРАТТЫҚ ЖӘНЕ
КОММУНИКАЦИЯЛЫҚ ТЕХНОЛОГИЯЛАР
ЖУРНАЛЫ**

**МЕЖДУНАРОДНЫЙ ЖУРНАЛ
ИНФОРМАЦИОННЫХ И
КОММУНИКАЦИОННЫХ ТЕХНОЛОГИЙ**

**INTERNATIONAL JOURNAL OF INFORMATION
AND COMMUNICATION TECHNOLOGIES**

2025 (24) 4

қазан- желтоқсан

ISSN 2708–2032 (print)
ISSN 2708–2040 (online)

БАС РЕДАКТОР:

Исахов Асылбек Абдишимович — есептеу теориясы саласында математика бойынша PhD доктор, "Компьютерлік ғылымдар және информатика" бағыты бойынша қауымдастырылған профессор, Халықаралық ақпараттық технологиялар университетінің Басқарма Төрағасы – Ректор (Қазақстан)

БАС РЕДАКТОРДЫҢ ОРЫНБАСАРЫ:

Колесникова Катерина Викторовна — техника ғылымдарының докторы, профессор, Халықаралық ақпараттық технологиялар университетінің ғылыми-зерттеу қызметі жөніндегі проректор (Қазақстан)

ҒАЛЫМ ХАТШЫ:

Ипалакова Мадина Түлегеновна — техника ғылымдарының кандидаты, қауымдастырылған профессор, Халықаралық ақпараттық технологиялар университетінің ғылыми-зерттеу қызметі жөніндегі департамент директоры (Қазақстан)

РЕДАКЦИЯЛЫҚ АЛҚА:

Разак Абдул — PhD, Халықаралық ақпараттық технологиялар университеті киберқауіпсіздік кафедрасының профессоры (Қазақстан)
Лучино Томмазо де Паолис — Саленто Университеті (Италия) инновация және технологиялық инжиниринг департаменті AVR зертханасының зерттеу және әзірлеу бөлімінің директоры

Лиз Бэкон — профессор, Абертей Университеті (Ұлыбритания) вице-канцлерінің орынбасары

Микеле Пагано — PhD, Пиза Университетінің (Италия) профессоры

Өтелбаев Мұхтарбай Өтелбайұлы — физика-математика ғылымдарының докторы, профессор, КР ҰҒА академигі, Халықаралық ақпараттық технологиялар университеті математика және компьютерлік модельдеу кафедрасының профессоры (Қазақстан)

Рысбайұлы Болатбек — физика-математика ғылымдарының докторы, профессор, Есептеу және деректер ғылымдары департаментінің профессоры, Astana IT University (Қазақстан)

Дайнеко Евгения Александровна — PhD, Халықаралық ақпараттық технологиялар университеті ақпараттық жүйелер кафедрасының профессор-зерттеушісі (Қазақстан)

Дузаев Нуржан Токсужаевич — PhD, қауымдастырылған профессор, Халықаралық ақпараттық технологиялар университеті цифрландыру және инновациялар жөніндегі проректор (Қазақстан)

Синчев Бахтгерей Куспанович — техника ғылымдарының докторы, профессор, Халықаралық ақпараттық технологиялар университеті ақпараттық жүйелер кафедрасының профессоры (Қазақстан)

Сейлова Нургуль Абдуллаевна — техника ғылымдарының докторы, Халықаралық ақпараттық технологиялар университеті компьютерлік технологиялар және киберқауіпсіздік факультетінің деканы (Қазақстан)

Мұхамедиева Ардак Габитовна — экономика ғылымдарының кандидаты, Халықаралық ақпараттық технологиялар университеті бизнес медиа және басқару факультетінің деканы (Қазақстан)

Абдикаликова Замира Тұрсынбаевна — PhD, қауымдастырылған профессор, Халықаралық ақпараттық технологиялар университеті математика және компьютерлік модельдеу кафедрасының меңгерушісі (Қазақстан)

Шильдибеков Ерлан Жаржанович — PhD, қауымдастырылған профессор, Халықаралық ақпараттық технологиялар университеті экономика және бизнес кафедрасының меңгерушісі (Қазақстан)

Дамелия Максумовна Ескендірова — техника ғылымдарының кандидаты, қауымдастырылған профессор, Халықаралық ақпараттық технологиялар университеті киберқауіпсіздік кафедрасының меңгерушісі (Қазақстан)

Ниязгулова Айгуль Аскарбековна — филология ғылымдарының кандидаты, доцент, профессор, Халықаралық ақпараттық технологиялар университеті медиакоммуникация және Қазақстан тарихы кафедрасының меңгерушісі (Қазақстан)

Айтмағамбетов Алтай Зуфарович — техника ғылымдарының кандидаты, Халықаралық ақпараттық технологиялар университеті радиотехника, электроника және телекоммуникация кафедрасының профессоры (Қазақстан)

Бахтиярова Елена Азизбековна — техника ғылымдарының кандидаты, қауымдастырылған профессор, Халықаралық ақпараттық технологиялар университеті радиотехника, электроника және телекоммуникация кафедрасының меңгерушісі (Қазақстан)

Канибек Сансызбай — PhD, қауымдастырылған профессор, Халықаралық ақпараттық технологиялар университеті киберқауіпсіздік кафедрасының профессор-зерттеушісі (Қазақстан)

Тынымбаев Сахиябай — техника ғылымдарының кандидаты, профессор, Халықаралық ақпараттық технологиялар университеті компьютерлік инженерия кафедрасының профессор-зерттеушісі (Қазақстан)

Алимереб Али Абд — PhD, Халықаралық ақпараттық технологиялар университеті киберқауіпсіздік кафедрасының қауымдастырылған профессоры (Қазақстан)

Мохамед Ахмед Хамада — PhD, Халықаралық ақпараттық технологиялар университеті ақпараттық жүйелер кафедрасының қауымдастырылған профессоры (Қазақстан)

Янг Им Чу — PhD, Гачон университетінің профессоры (Оңтүстік Корея)

Талеуш Валдас — PhD, Адам Мицкевич атындағы (Польша) университеттің проректоры

Мамырбаев Оркен Жұмажанович — PhD, КР ҒЖБМ Ғылым комитеті ақпараттық және есептеу технологиялары институты ӨМК директорының ғылым жөніндегі орынбасары (Қазақстан)

Бушув Сергей Дмитриевич — техника ғылымдарының докторы, профессор, Украинаның "УКРНЕТ" жобаларды басқару қауымдастығының директоры, Киев ұлттық құрылыс және сәулет университеті жобаларды басқару кафедрасының меңгерушісі (Украина)

Белошицкая Светлана Васильевна — техника ғылымдарының докторы, доцент, Astana IT University есептеу және деректер ғылымы кафедрасының профессоры (Қазақстан)

РЕДАКТОР:

Мрзабаева Раушан Жалиевна — магистр, Халықаралық ақпараттық технологиялар университетінің редакторы (Қазақстан)

Халықаралық ақпараттық және коммуникациялық технологиялар журналы

ISSN 2708–2032 (print)

ISSN 2708–2040 (online)

Меншік иесі: АҚ «Халықаралық ақпараттық технологиялар университеті» (Алматы қ.).

Қазақстан Республикасы Ақпарат және қоғамдық даму министрлігіне мерзімді баспасөз басылымын есепке қою туралы куәлік № KZ82VPY00020475, 20.02.2020 ж. берілген

Тақырып бағыты: ақпараттық технологиялар, ақпараттық қауіпсіздік және коммуникациялық технологиялар, әлеуметтік-экономикалық жүйелерді дамытудағы цифрлық технология.

Мерзімділігі: жылына 4 рет.

Тираж: 100 дана.

Редакция мекенжайы: 050040 Алматы қ., Манас к., 34/1, каб. 709, тел: +7 (727) 244-51-09.

E-mail: ijict@iitu.edu.kz

Журнал сайты: <https://journal.iitu.edu.kz>

© Халықаралық ақпараттық технологиялар университеті АҚ, 2025

Журнал сайты: <https://journal.iitu.edu.kz> © Авторлар ұжымы, 2025

ГЛАВНЫЙ РЕДАКТОР

Исахов Асылбек Абдиашимович — доктор PhD по математике в области теории вычислимости, ассоциированный профессор по направлению "Компьютерные науки и информатика", Председатель Правления – Ректор Международного университета информационных технологий (Казахстан)

ЗАМЕСТИТЕЛЬ ГЛАВНОГО РЕДАКТОРА:

Колесникова Катерина Викторовна — доктор технических наук, профессор, проректор по научно-исследовательской деятельности Международного университета информационных технологий (Казахстан)

УЧЕНЫЙ СЕКРЕТАРЬ:

Ипалакова Мадина Тулегеновна — кандидат технических наук, ассоциированный профессор, директор департамента по научно-исследовательской деятельности Международного университета информационных технологий (Казахстан)

РЕДАКЦИОННАЯ КОЛЛЕГИЯ:

Разак Абдул — PhD, профессор кафедры кибербезопасности Международного университета информационных технологий (Казахстан)

Лучио Томмазо де Паолис — директор отдела исследований и разработок лаборатории AVR департамента инноваций и технологического инжиниринга Университета Саленто (Италия)

Лиз Бэкон — профессор, заместитель вице-канцлера Университета Абертей (Великобритания)

Микеле Пагано — PhD, профессор Университета Пизы (Италия)

Отелбаев Мухтарбай Отелбайұлы — доктор физико-математических наук, профессор, академик НАН РК, профессор кафедры математического и компьютерного моделирования Международного университета информационных технологий (Казахстан)

Рысбайұлы Болатбек — доктор физико-математических наук, профессор, профессор Astana IT University (Казахстан)

Дайнеко Евгения Александровна — PhD, профессор-исследователь кафедры информационных систем Международного университета информационных технологий (Казахстан)

Дузбаев Нуржан Токкужаевич — PhD, ассоциированный профессор, проректор по цифровизации и инновациям Международного университета информационных технологий (Казахстан)

Синчев Бахтгерей Куспанович — доктор технических наук, профессор, профессор кафедры информационных систем Международного университета информационных технологий (Казахстан)

Сейлова Нургуль Абадуллаевна — кандидат технических наук, декан факультета компьютерных технологий и кибербезопасности Международного университета информационных технологий (Казахстан)

Мухамедиева Ардак Габитовна — кандидат экономических наук, декан факультета бизнеса медиа и управления Международного университета информационных технологий (Казахстан)

Абдикаликова Замира Турсынбаевна — PhD, ассоциированный профессор, заведующая кафедрой математического и компьютерного моделирования Международного университета информационных технологий (Казахстан)

Шильдибеков Ерлан Жаржанович — PhD, ассоциированный профессор, заведующий кафедрой экономики и бизнеса Международного университета информационных технологий (Казахстан)

Дамеля Максумовна Ескендирова — кандидат технических наук, ассоциированный профессор, заведующая кафедрой кибербезопасности Международного университета информационных технологий (Казахстан)

Ниязгулова Айгуль Аскарбековна — кандидат филологических наук, доцент, профессор, заведующая кафедрой медиакоммуникации и истории Казахстана Международного университета информационных технологий (Казахстан)

Айтмагамбетов Алтай Зуфарович — кандидат технических наук, профессор кафедры радиотехники, электроники и телекоммуникаций Международного университета информационных технологий (Казахстан)

Бахтиярова Елена Ажибековна — кандидат технических наук, ассоциированный профессор, заведующая кафедрой радиотехники, электроники и телекоммуникаций Международного университета информационных технологий (Казахстан)

Канибек Сансызбай — PhD, ассоциированный профессор, профессор-исследователь кафедры кибербезопасности, Международного университета информационных технологий (Казахстан)

Тынымбаев Сахиябай — кандидат технических наук, профессор, профессор-исследователь кафедры компьютерной инженерии, Международного университета информационных технологий (Казахстан)

Алмисреб Али Абд — PhD, ассоциированный профессор кафедры кибербезопасности Международного университета информационных технологий (Казахстан)

Мохамед Ахмед Хамада — PhD, ассоциированный профессор кафедры информационных систем Международного университета информационных технологий (Казахстан)

Янг Им Чу — PhD, профессор университета Гачон (Южная Корея)

Талеуш Валлас — PhD, проректор университета имен Адама Мицкевича (Польша)

Мамырбаев Оркен Жумажанович — PhD, заместитель директора по науке РГП Института информационных и вычислительных технологий Комитета науки МНВО РК (Казахстан)

Бушуев Сергей Дмитриевич — доктор технических наук, профессор, директор Украинской ассоциации управления проектами «УКРНЕТ», заведующий кафедрой управления проектами Киевского национального университета строительства и архитектуры (Украина)

Белошницкая Светлана Васильевна — доктор технических наук, доцент, профессор кафедры вычислений и науки о данных Astana IT University (Казахстан)

РЕДАКТОР:

Мрзабаева Раушан Жалиевна — магистр, редактор Международного университета информационных технологий (Казахстан)

Международный журнал информационных и коммуникационных технологий

ISSN 2708–2032 (print)

ISSN 2708–2040 (online)

Собственник: АО «Международный университет информационных технологий» (г. Алматы).

Свидетельство о постановке на учет периодического печатного издания в Министерство информации и общественного развития Республики Казахстан № KZ82VPY00020475, выданное от 20.02.2020 г.

Тематическая направленность: информационные технологии, информационная безопасность и коммуникационные технологии, цифровые технологии в развитии социально-экономических систем.

Периодичность: 4 раза в год.

Тираж: 100 экземпляров.

Адрес редакции: 050040 г. Алматы, ул. Манаса 34/1, каб. 709, тел: +7 (727) 244-51-09.

E-mail: ijict@iitu.edu.kz

Сайт журнала: <https://journal.iitu.edu.kz>

© АО Международный университет информационных технологий, 2025

© Коллектив авторов, 2025

EDITOR-IN-CHIEF

Assylbek Issakhov — PhD in Mathematics in Computability Theory, associate professor in “Computer Science and Informatics,” Chairman of the Board – Rector of the International Information Technology University (Kazakhstan)

DEPUTY EDITOR-IN-CHIEF

Kateryna Kolesnikova — Doctor of Technical Sciences, professor, Vice-Rector for Research, International Information Technology University (Kazakhstan)

ACADEMIC SECRETARY

Madina Ipalakova — Candidate of Technical Sciences, associate professor, Director of the Research Department, International Information Technology University (Kazakhstan)

EDITORIAL BOARD

Abdul Razak — PhD, professor, Department of Cybersecurity, International Information Technology University (Kazakhstan)

Lucio Tommaso De Paolis — Director of the R&D Department of the AVR Laboratory, Department of Engineering for Innovation, University of Salento (Italy)

Liz Bacon — Professor, Deputy Vice-Chancellor, Abertay University (United Kingdom)

Michele Pagano — PhD, Professor, University of Pisa (Italy)

Mukhtarbay Otelbayev — Doctor of Physical and Mathematical Sciences, professor, academician of the National Academy of Sciences of the Republic of Kazakhstan, professor of the Department of Mathematical and Computer Modeling, International Information Technology University (Kazakhstan)

Bolatbek Rysbauly — Doctor of Physical and Mathematical Sciences, professor, professor of the Department of Computing and Data Science, Astana IT University (Kazakhstan)

Yevgeniya Daineko — PhD, research professor, Department of Information Systems, International Information Technology University (Kazakhstan)

Nurzhan Duzbayev — PhD, associate professor, Vice-Rector for Digitalization and Innovation, International Information Technology University (Kazakhstan)

Bakhtgerai Sinchev — Doctor of Technical Sciences, professor, Department of Information Systems, International Information Technology University (Kazakhstan)

Nurgul Seilova — Candidate of Technical Sciences, Dean of the Faculty of Computer Technologies and Cybersecurity, International Information Technology University (Kazakhstan)

Ardak Mukhamediyeva — Candidate of Economic Sciences, Dean of the Faculty of Business, Media and Management, International Information Technology University (Kazakhstan)

Zamira Abdikalikova — PhD, associate professor, Head of the Department of Mathematical and Computer Modeling, International Information Technology University (Kazakhstan)

Yerlan Shildibekov — PhD, associate professor, Head of the Department of Economics and Business, International Information Technology University (Kazakhstan)

Damilya Yeskendirova — Candidate of Technical Sciences, associate professor, Head of the Department of Cybersecurity, International Information Technology University (Kazakhstan)

Aigul Niyazgulova — Candidate of Philological Sciences, Professor, Head of the Department of Media Communications and History of Kazakhstan, International Information Technology University (Kazakhstan)

Altai Aitmagambetov — Candidate of Technical Sciences, Professor, Department of Radio Engineering, Electronics and Telecommunications, International Information Technology University (Kazakhstan)

Yelena Bakhtiyarova — Candidate of Technical Sciences, associate professor, Head of the Department of Radio Engineering, Electronics and Telecommunications, International Information Technology University (Kazakhstan)

Kanibek Sansyzbay — PhD, research professor, Department of Cybersecurity, International Information Technology University (Kazakhstan)

Sakhybay Tynymbayev — Candidate of Technical Sciences, Professor, Research Professor, Department of Computer Engineering, International Information Technology University (Kazakhstan)

Ali Abd Almisreb — PhD, associate professor, Department of Cybersecurity, International Information Technology University (Kazakhstan)

Mohamed Ahmed Hamada — PhD, associate professor, Department of Information Systems, International Information Technology University (Kazakhstan)

Yang Im Chu — PhD, Professor, Gachon University (South Korea)

Tadeusz Wallas — PhD, Vice-Rector, Adam Mickiewicz University (Poland)

Orken Mamyrbayev — PhD, Deputy Director for Science, RSE Institute of Information and Computational Technologies, Committee for Science of the Ministry of Science and Higher Education of the Republic of Kazakhstan (Kazakhstan)

Sergey Bushuyev — Doctor of Technical Sciences, professor, Director of the Ukrainian Project Management Association “UKRNET,” Head of the Department of Project Management, Kyiv National University of Construction and Architecture (Ukraine)

Svetlana Beloshitskaya — Doctor of Technical Sciences, professor, Department of Computing and Data Science, Astana IT University (Kazakhstan)

EDITOR

Raushan Mrzabayeva — Master of Science, editor, International Information Technology University (Kazakhstan)

«International Journal of Information and Communication Technologies»

ISSN 2708–2032 (print)

ISSN 2708–2040 (online)

Owner: International Information Technology University JSC (Almaty).

The certificate of registration of a periodical printed publication in the Ministry of Information and Social Development of the Republic of Kazakhstan, Information Committee No. KZ82VPY00020475, issued on 20.02.2020.

Thematic focus: information technology, digital technologies in the development of socio-economic systems, information security and communication technologies

Periodicity: 4 times a year.

Circulation: 100 copies.

Editorial address: 050040. Manas st. 34/1, Almaty. +7 (727) 244-51-09. E-mail: ijict@iitu.edu.kz

Journal website: <https://journal.iitu.edu.kz>

© International Information Technology University JSC, 2025

© Group of authors, 2025

INTERNATIONAL JOURNAL OF INFORMATION AND COMMUNICATION TECHNOLOGIES

ISSN 2708–2032 (print)

ISSN 2708–2040 (online)

Vol. 6. Is. 4. Number 24 (2025). Pp. 94–113

Journal homepage: <https://journal.iitu.edu.kz><https://doi.org/10.54309/IJICT.2025.24.4.006>

УДК 004.931

DEVELOPMENT OF A HYBRID MODEL FOR PREDICTING SOIL SALINITY LEVELS BASED ON HYDROLOGICAL PROCESSES AND SPECTRAL DATA ANALYSIS

A. Bissengaliyeva¹, D. Khamitova¹, E. Tulegenova³, N. Uzakkyzy²,
S. Akhmedova⁴*

¹Zhangir Khan West Kazakhstan Agrarian-Technical University NCJSC, Uralsk, Kazakhstan;

²Eurasian National University named after L.N. Gumilyov, Astana, Kazakhstan;

³Kyzylorda University named after Korkyt Ata, Kyzylorda, Kazakhstan;

⁴Sumgait State University, Sumgait, Azerbaidzhan.

E-mail: danahamitova730@gmail.com

Assyl Bissengaliyeva— Master of Technical Sciences, Zhangir Khan West Kazakhstan Agrarian-Technical University NCJSC, Uralsk, Kazakhstan

E-mail: Bamsave@mail.ru. <https://orcid.org/0000-0002-6914-2352>;

Dana Khamitova — PhD candidate, Department of Information Systems, L.N. Gumilyov Eurasian National University, Astana, Kazakhstan

<https://orcid.org/0009-0000-2794-3568>;

Elmira Tulegenova — associate professor, the Department of Computer Science, Korkyt Ata Kyzylorda University, Candidate of Economic Sciences, Kyzylorda, Kazakhstan

<https://orcid.org/0000-0003-4501-7343>;

Nurgul Uzakkyzy — PhD, senior lecturer, the Department of Computer and Software Engineering, Eurasian National University named after L.N. Gumilyov, Astana, Kazakhstan

<https://orcid.org/0000-0002-8262-0240>;

Svetlana Akhmedova — senior lecturer, Department of Information Technology and Programming, Sumgait State University, Sumgait, Azerbaidzhan

© A. Bissengaliyeva, D. Khamitova, E. Tulegenova, N. Uzakkyzy, S. Akhmedova

Abstract. Soil salinity is one of the most critical environmental and agricultural issues, especially in the arid and semi-arid regions of Kazakhstan. It leads to reduced soil fertility, land degradation, and poses a threat to food security. The aim of this study is to develop a hybrid model for predicting soil salinity levels by integrating



This work is licensed under a Creative Commons Attribution-NonCommercial-NoDerivatives 4.0 International License

spectral remote sensing data (Sentinel-2) and hydrological parameters from ERA5-Land. Principal Component Analysis (PCA), K-Means clustering, and the XGBoost algorithm were applied to identify informative features and improve prediction accuracy. Spatial data were processed in the Google Earth Engine environment, where spectral and hydrological parameters for two contrasting regions of Kazakhstan — Akmola region and the dried Aral Sea area — were combined. The results showed that the hybrid model reduced the mean squared error (MSE) by 26 % compared to the baseline XGBoost model and successfully classified up to 98 % of saline soils. The study demonstrates the high potential of an integrated approach combining remote sensing and hydrological modeling for land degradation monitoring and assessment.

Keywords: soil salinity; remote sensing; Sentinel-2; ERA5-Land; hydrological data; spectral indices; principal component analysis (PCA); K-Means clustering; XGBoost algorithm

For citation: G.A. Bissengaliyeva, D. Khamitova, E. Tulegenova, N. Uzakkyzy, S. Akhmedova. Development of a Hybrid Model for Predicting Soil Salinity Levels Based on Hydrological Processes and Spectral Data Analysis // International journal of information and communication technologies. 2025. Vol. 6. No. 24. Pp. 94–113 (In Kaz.). <https://doi.org/10.54309/IJICT.2025.24.4.006>.

Conflict of interest: The authors declare that there is no conflict of interest.

ГИДРОЛОГИЯЛЫҚ ҮДЕРІСТЕР МЕН СПЕКТРАЛДЫҚ ДЕРЕКТЕРДІ ТАЛДАУ НЕГІЗІНДЕ ТОПЫРАҚТЫҢ ТҰЗДАНУ ДЕҢГЕЙІН БОЛЖАУДЫҢ ГИБРИДТІ МОДЕЛІН ӘЗІРЛЕУ

А.М. Бисенгалиева¹, Д.Т. Хамитова^{2,}, Э.Н. Тулегенова³, Н. Ұзаққызы²,
С.М. Ахмедова⁴*

¹Жәңгір хан атындағы Батыс Қазақстан аграрлық-техникалық университеті,
КЕАҚ, Орал, Қазақстан;

²Л.Н. Гумилев атындағы Еуразия ұлттық университеті, Астана, Қазақстан;

³Кызылординский университет имени Коркыт Ата, Кызылорда, Қазақстан;

⁴Сумгаит мемлекеттік университеті, Сумгаит, Әзірбайжан.

E-mail: danahamitova730@gmail.com

Бисенгалиева Асыл — Техника ғылымдарының магистрі, аға оқытушы, Жәңгір хан атындағы Батыс Қазақстан аграрлық-техникалық университеті» КЕАҚ, Орал, Қазақстан

E-mail: Bamsave@mail.ru, <https://orcid.org/0000-0002-6914-2352>;

Хамитова Дана — Л.Н. Гумилев атындағы Еуразия ұлттық университеті, «Ақпараттық жүйелер» кафедрасының 2 курс докторанты, Астана, Қазақстан
<https://orcid.org/0009-0000-2794-3568>;

Тулегенова Эльмира Нургалиевна — Кызылординский университет имени Коркыт Ата, ассоциированный профессор кафедры «Компьютерные науки»,

кандидат экономических наук, Кызылорда, Казахстан

<https://orcid.org/0000-0003-4501-7343>;

Ұзаққызы Нұргүл — PhD, Л.Н. Гумилев атындағы Еуразия ұлттық университетінің «Компьютерлік және программалық инженерия» кафедрасының аға оқытушысы, Астана, Қазақстан

<https://orcid.org/0000-0002-8262-0240>;

Ахмедова Светлана Магеррам — Сумгаит мемлекеттік университетінің ақпараттық технологиялар және бағдарламалау кафедрасының аға оқытушысы, Сумгаит, Әзірбайжан

© А.М.Бисенгалиева, Д.Т. Хамитова, Э.Н. Тулегенова, Н. Ұзаққызы, С.М. Ахмедова

Аннотация. Топырақтың тұздануы – Қазақстанның аридті және шөлейт аймақтарында байқалатын ең өзекті экологиялық және аграрлық мәселелердің бірі. Бұл құбылыс жер құнарлылығының төмендеуіне, жердің деградациясына және азық-түлік қауіпсіздігіне қатер төндіреді. Осы зерттеудің мақсаты – қашықтықтан зондтау (Sentinel-2) спектралдық деректері мен ERA5-Land гидрологиялық көрсеткіштерін біріктіру негізінде топырақтың тұздану деңгейін болжаудың гибриді моделін әзірлеу. Талдау үшін басты компоненттер әдісі (PCA), K-Means кластерлеу тәсілі және XGBoost алгоритмі қолданылды, бұл ақпараттық белгілерді бөліп көрсетуге және болжам дәлдігін арттыруға мүмкіндік берді. Ғарыштық деректер Google Earth Engine ортасында өңделді, мұнда Қазақстанның екі қарама-қарсы өңірі — Ақмола облысы мен тартылған Арал теңізі аймағының спектралдық және гидрологиялық параметрлері біріктірілді. Нәтижелер көрсеткендей, гибриді модель XGBoost базалық моделіне қарағанда орташа квадраттық қатені (MSE) 26 %-ға азайтып, тұзданған топырақтардың 98 %-ын сәтті жіктейді. Зерттеу қашықтықтан зондтау мен гидрологиялық модельдеуді біріктіретін кешенді тәсілдің жердің деградациясын мониторингтілеу мен бағалаудағы жоғары әлеуетін дәлелдейді.

Түйін сөздер: топырақтың тұздануы; қашықтықтан зондтау; Sentinel-2; ERA5-Land; гидрологиялық деректер; спектралдық индекстер; басты компоненттер әдісі (PCA); K-Means кластерлеу; XGBoost алгоритмі; болжау

Дәйексөздер үшін: А.М. Бисенгалиева, Д.Т. Хамитова, Э.Н. Тулегенова, Н. Ұзаққызы, С.М. Ахмедова. Негізінде топырақтың тұздану деңгейін болжаудың гибриді моделін әзірлеу // Халықаралық ақпараттық және коммуникациялық технологиялар журналы. 2025. Том. 6. № 24. 94–113 бет. (Қаз). <https://doi.org/10.54309/IJICT.2025.24.4.006>.

Мүдделер қақтығысы: Авторлар осы мақалада мүдделер қақтығысы жоқ деп мәлімдейді.

РАЗРАБОТКА ГИБРИДНОЙ МОДЕЛИ ПРОГНОЗИРОВАНИЯ УРОВНЯ ЗАСОЛЕННОСТИ ПОЧВ НА ОСНОВЕ ГИДРОЛОГИЧЕСКИХ ПРОЦЕССОВ И АНАЛИЗА СПЕКТРАЛЬНЫХ ДАННЫХ



This work is licensed under a Creative Commons Attribution-NonCommercial-NoDerivatives 4.0 International License

**А.М. Бисенгалиева¹, Д.Т. Хамитова^{2,*}, Э.Н. Тулегенова³, Н. Узаккызы²,
С.М. Ахмедова⁴**

¹Западно-Казахстанский аграрно-технический университет имени Жангир хана, Уральск, Казахстан;

²Евразийский национальный университет имени Л.Н. Гумилёва, Астана, Казахстан;

³Кызылординский университет имени КORKYT Ата, Кызылорда, Казахстан;

⁴Сумгаитский государственный университет, Сумгаит, Азербайджан.

E-mail: danahamitova730@gmail.com

Бисенгалиева Асыл — магистр технических наук, старший преподаватель, НАО «Западно-Казахстанский аграрно-технический университет имени Жангир хана», Уральск, Казахстан

E-mail: Bamsave@mail.ru, <https://orcid.org/0000-0002-6914-2352>;

Хамитова Дана — докторант, кафедра информационных систем, Евразийский национальный университет имени Л.Н. Гумилева, Астана, Казахстан

<https://orcid.org/0009-0000-2794-3568>;

Тулегенова Эльмира — кандидат экономических наук, ассоциированный профессор, кафедра компьютерных наук, Кызылординский университет имени КORKYT Ата, Кызылорда, Казахстан

<https://orcid.org/0000-0003-4501-7343>;

Узаккызы Нургул — PhD, старший преподаватель, кафедра компьютерной и программной инженерии», Евразийский национальный университет имени Л.Н. Гумилёва, Астана, Казахстан

<https://orcid.org/0000-0002-8262-0240>;

Ахмедова Светлана Магеррам — старший преподаватель, кафедра информационных технологий и программирования, Сумгаитский государственный университет, Сумгаит, Азербайджан.

© А.М. Бисенгалиева, Д.Т. Хамитова, Э.Н. Тулегенова, Н. Узаккызы, С.М. Ахмедова

Аннотация. Засоленность почв является одной из наиболее острых экологических и аграрных проблем, особенно в аридных и семиаридных зонах Казахстана. Она приводит к снижению плодородия, деградации земель и угрозе продовольственной безопасности. Цель данного исследования заключается в разработке гибридной модели прогнозирования уровня засоленности почв на основе интеграции спектральных данных дистанционного зондирования (Sentinel-2) и гидрологических показателей ERA5-Land. Для анализа использованы методы главных компонент (PCA), кластеризации K-Means и алгоритм XGBoost, что позволило выделить информативные признаки и улучшить точность прогноза. Пространственные данные были обработаны в среде Google Earth Engine, где объединялись спектральные и гидрологические параметры для двух контрастных регионов Казахстана — Акмолинской области

This work is licensed under a Creative Commons Attribution-NonCommercial-NoDerivatives 4.0

International License



и зоны высохшего Аральского моря. Результаты показали, что гибридная модель обеспечивает снижение средней квадратичной ошибки (MSE) на 26 % по сравнению с базовым XGBoost и успешно классифицирует до 98 % засоленных почв. Исследование демонстрирует высокий потенциал комплексного подхода, объединяющего дистанционное зондирование и гидрологическое моделирование, для мониторинга и оценки деградации земель.

Ключевые слова: засоленность почв; дистанционное зондирование; Sentinel-2; ERA5-Land; гидрологические данные; спектральные индексы; метод главных компонент (PCA); кластеризация K-Means; алгоритм XGBoost; прогнозирование

Для цитирования: А.М. Бисенгалиева, Д.Т. Хамитова, Э.Н. Тулегенова, Н. Узаккызы, С.М. Ахмедова. Разработка гибридной модели прогнозирования уровня засоленности почв на основе гидрологических процессов и анализа спектральных данных // Международный журнал информационных и коммуникационных технологий. 2025. Т. 6. No. 24. Стр. 94–113. (На каз.). <https://doi.org/10.54309/IJICT.2025.24.4.006>.

Конфликт интересов: авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов.

Кіріспе

Топырақтың тұздануы – Қазақстанның аридті және шөлейт аймақтарында жиі кездесетін, ауыл шаруашылығы өнімділігіне, экожүйелердің тұрақтылығына және жер ресурстарының сапасына тікелей әсер ететін маңызды экологиялық мәселе болып табылады (Jiang et al., 2025). Бұл құбылыс топырақтың құнарлылығының төмендеуіне, судың сіңірілуі мен булану тепе-теңдігінің бұзылуына және жердің деградациясына әкеледі. Климаттың өзгеруі мен антропогендік әсердің күшеюі жағдайында тұздану процестерінің кеңістік-уақыттық динамикасын бағалау мен болжау қажеттілігі арта түсуде. Қазіргі таңда ауыл шаруашылығы саласында жер сапасының төмендеуі азық-түлік қауіпсіздігіне қауіп төндіруде, сондықтан топырақтың тұздануын анықтау мен мониторингілеу тәсілдерін жетілдіру өзекті ғылыми міндетке айналып отыр.

Қашықтықтан зондтау (Sentinel-2) және климаттық модельдердің (ERA5-Land) деректерін пайдалану арқылы топырақтың физикалық және гидрологиялық сипаттамаларын интеграциялау тұздану деңгейін дәл бағалауға мүмкіндік береді. Ғылыми еңбектерде топырақ тұздылығын бағалау үшін спектралдық индекстер (NDVI, NDSI, BI және т.б.) мен машиналық оқыту әдістерін (PCA, K-Means, XGBoost) қолданудың түрлі тәсілдері қарастырылған. Дегенмен, бұл тәсілдердің көпшілігі деректердің әртектілігі мен белгілердің жеткіліксіздігіне байланысты болжамның дәлдігін қамтамасыз ете алмайды. Дәстүрлі бақыланатын оқыту үлгілері нақты белгілердің шектеулігі мен модельдің локалды бейімделмеуінен зардап шегеді.

Осыған байланысты, соңғы жылдары бақыланбайтын (кластерлеу) және



бақыланатын (регрессия және классификация) әдістерді біріктіретін гибриді тәсілдерге қызығушылық артып келеді. Мұндай модельдер деректердің күрделі құрылымын жақсы сипаттап, кеңістіктік біркелкі еместікті ескеруге мүмкіндік береді. Осы бағыттағы ғылыми ізденістер Қазақстан аумағында әртүрлі табиғи және климаттық аймақтардағы топырақ тұздануының кеңістік динамикасын анықтауға бағытталған. Атап айтқанда, спутниктік бейнелер мен гидрологиялық параметрлерді біріктіретін тәсілдер болжам дәлдігін арттыруға мүмкіндік береді (Gao & Xu, 2025).

Осы тұрғыда бұл зерттеудің мақсаты – спутниктік спектралдық және гидрологиялық деректерді біріктіретін топырақ тұздылығын болжаудың гибриді моделін әзірлеу. Ұсынылып отырған әдіс басты компоненттер әдісі (PCA), K-Means кластерлеуі және XGBoost алгоритмін біріктіру арқылы ақпараттық белгілерді тиімді іріктеуді және болжам дәлдігін арттыруды көздейді. Зерттеу нәтижелері Қазақстанның Ақмола облысы мен бұрынғы Арал теңізі аймағы сияқты контрастты өңірлер мысалында алынған деректерге негізделген. Алынған нәтижелер ұсынылып отырған тәсілдің топырақ тұздылығын жоғары дәлдікпен жіктеуге және жер деградациясын мониторингілеудің тиімділігін арттыруға мүмкіндік беретінін көрсетеді.

Әдістер мен материалдар

Зерттеу жұмысы екі өңірді қамтиды: Ақмола облысының Бозайғыр ауылы және құрғап қалған Арал теңізінің аймағы. Бұл екі аймақ контрастты табиғи және гидрологиялық жағдайларға ие болғандықтан таңдалды, себебі олар топырақ тұздылығының әртүрлі деңгейлерін салыстыруға мүмкіндік береді. Ақмола облысы қалыпты континенттік климатпен және аграрлық әлеуеті жоғары қара топырақтарымен ерекшеленеді, ал Арал өңірі топырақ деградациясы мен жоғары тұздылықтың айқын мысалы болып табылады.

Осы өңірлерге арналған деректер Sentinel-2 спутнигінен (Becker et al., 2025) және ERA5-Land климаттық моделінен (Cui et al., 2025; Hersbach et al., 2023) алынды. Sentinel-2 суреттері жаз айларында (маусым–тамыз, 2021 ж.) жиналды, ал ERA5-Land деректері топырақ ылғалдылығының төрт қабатын (0–7 см, 7–28 см, 28–100 см және 100–289 см) қамтыды. Барлық спутниктік суреттер Google Earth Engine (GEE) платформасы арқылы Copernicus Sentinel деректерінен алынды (Copernicus Open Access Hub, 2025). Барлық деректер Google Earth Engine (GEE) платформасында өңделіп, кеңістіктік ажыратымдылығы 10 метр деңгейінде біріктірілді. Бақыланбайтын кластерлеу әдістері кеңістіктік деректерді құрылымдық түрде бөлуге және ұқсас қасиеттері бар аймақтарды анықтауға мүмкіндік береді (Bo et al., 2024). Топырақ тұздылығын сипаттау үшін Sentinel-2 спутнигінің көпарналы спектрлік деректері негізінде бірқатар индекстер қолданылды (Becker et al., 2025). Бұл индекстер көрінетін және инфрақызыл диапазондардағы шағылу қасиеттерін салыстыру арқылы есептеледі. Қолданылған негізгі индекстер мен олардың есептеу формулалары 1-кестеде көрсетілген.

Salinity indices	Spectral Functions	Reference
Normalized Differential Salinity Index	$NDSI = \frac{R - NIR}{R + NIR}$	(Khan <i>et al.</i> , 2005)
Brightness index	$BI = \sqrt{R^2 + NIR^2}$	(Khan <i>et al.</i> , 2005)
Salinity Index 1	$SI1 = \sqrt{B + R}$	(Douaoui <i>et al.</i> , 2006)
Salinity Index 2	$SI2 = \sqrt{G^2 + R^2 + NIR^2}$	(Douaoui <i>et al.</i> , 2006)
Salinity Index 3	$SI3 = \frac{SWIR - 1 \times SWIR - 2 \times SWIR - 2}{SWIR - 1}$	(Bannari <i>et al.</i> , 2008)
Salinity Index 4	$SI4 = \frac{R \times NIR}{G}$	(Abbas and Khan, 2007)
Salinity Index 5	$SI5 = \frac{G \times R}{r}$	(Bannari <i>et al.</i> , 2008)

Кесме 1. Қолданылған спектрлік индекстер және олардың есептеу формулалары.

1. Кестеде көрсетілген спектрлік индекстердің әрқайсысы топырақтың физикалық және химиялық қасиеттерін сипаттауда ерекше рөл атқарады. Сондықтан зерттеу барысында бұл индекстер жеке есептеліп, олардың мәндері тұздану деңгейін бағалаудың негізгі айнымалылары ретінде пайдаланылды. Төменде зерттеуде қолданылған негізгі индекстердің есептеу формулалары және олардың қолданылу ерекшеліктері келтірілген.

NDVI (Нормаланған айырмалы өсімдік индексі):

$$NDVI = \frac{NIR - R}{NIR + R} \quad (1)$$

мұндағы R – қызыл арна мәні (B4), NIR – жақын инфрақызыл арна (B8). Бұл индекс өсімдік жамылғысының белсенділігін сипаттайды және фотосинтез аймақтарын анықтауға мүмкіндік береді. $NDVI$ мәні жоғарылаған сайын өсімдіктердің өнімділігі мен топырақ ылғалдылығы жоғарырақ болады.

NDSI (Нормаланған айырмалы тұздылық индексі):

$$NDSI = \frac{R - NIR}{R + NIR} \quad (2)$$

мұндағы R – қызыл арнаның мәні (B4), NIR – жақын инфрақызыл арна (B8). Бұл индекс топырақтың тұздылық деңгейін бағалау үшін қолданылады.

NDWI (Нормаланған айырмалы су индексі):

$$NDWI = \frac{G - NIR}{G + NIR} \quad (3)$$

SI (Тұздылық индексі):

$$SI1 = \sqrt{B + R} \quad (4)$$

мұндағы B – көк арнаның мәні (B2), R – қызыл арнаның мәні (B4). Бұл индекс топырақтың тұздану деңгейін анықтау кезінде спектрлік шағылу қарқындылығын сипаттайды. SI мәні жоғарылаған сайын топырақ бетінің жарық шағылыстыру қабілеті артады, бұл көбіне тұз шөгінділерінің болуымен байланысты.

BI (Жарқындық индексі):

$$BI = \sqrt{R^2 + NIR^2} \quad (5)$$

мұндағы R – қызыл арнаның мәні (B4), NIR – жақын инфрақызыл арна (B8). Бұл индекс топырақ бетінің шағылу қарқындылығын сипаттайды және топырақтың физикалық күйін, оның ішінде тұз шөгінділері мен ылғалдылық деңгейін бағалауда қолданылады. BI мәні жоғары болған сайын, топырақ беті жарығырақ және құрғақ болып келеді.

SI2 (Тұздылық индексі 2):

$$SI2 = \sqrt{G^2 + R^2 + NIR^2} \quad (6)$$

мұндағы G – жасыл арнаның мәні (B3), R – қызыл арна (B4), NIR – жақын инфрақызыл арна (B8). Бұл индекс әртүрлі спектрлік арналардың комбинациясы арқылы топырақтың оптикалық және химиялық қасиеттерін сипаттайды. $SI2$ көрсеткіші тұзданған және тұзданбаған топырақтардың айырмашылығын анықтауға мүмкіндік береді.

SI3 (Тұздылық индексі 3):

$$SI3 = \frac{SWIR1 - (SWIR1 \cdot SWIR2)}{SWIR1} \quad (6)$$

мұндағы $SWIR1$ және $SWIR2$ – орта инфрақызыл диапазон арналарының мәндері (B11 және B12). Бұл индекс топырақтағы тұз мөлшерін бағалау үшін орта инфрақызыл диапазондағы шағылу қасиеттерін салыстырады. $SI3$ көрсеткіші тұз шөгінділерінің бар екендігін және олардың спектрлік айырмашылықтарын анықтауға мүмкіндік береді.

SI4 (Тұздылық индексі 4):

$$SI4 = \sqrt{R \cdot NIR} \quad (7)$$

мұндағы R – қызыл арнаның мәні (B4), NIR – жақын инфрақызыл арна (B8). Бұл индекс тұзданған топырақтың оптикалық белсенділігін анықтауға арналған. $SI4$ жоғары мәндері топырақтағы тұздың көптігін және шағылу қабілетінің артуын білдіреді.

SI5 (Тұздылық индексі 5):

$$SIS = \frac{R}{G \cdot \frac{R}{B}} \quad (8)$$

мұндағы R – қызыл арна (B4), G – жасыл арна (B3), B – көк арна (B2). Бұл индекс спектрлік арналар арасындағы қатынасты пайдалана отырып, топырақ бетінің шағылу қасиеттерін сипаттайды. SIS мәні жоғары болған сайын топырақтың тұздану дәрежесі артады және оның оптикалық белсенділігі күшейеді.

Зерттеудің бірінші кезеңі деректерді алдын ала өңдеуден тұрады. Бұл кезеңде бастапқы деректер одан әрі талдау үшін дайындалады, соның ішінде үлестірімнің асимметриясын жою және барлық мүмкіндіктерді бірыңғай шкалаға келтіру жүзеге асырылады. Біріншіден, логарифмдік түрлендіру қолданылады, ол шеткі мәндердің әсерін және үлестірімнің қисаюын азайтады. Әрі қарай деректер қалыпқа келтіріледі, сондықтан барлық көрсеткіштер $[0,1]$ диапазонында мәндерге ие болады. Бұл келесі машиналық оқыту алгоритмдерінің конвергенциясын жақсартады және әрбір айнымалының модельге біркелкі әсер етуін қамтамасыз етеді.

Алынған шамаларды қалыпқа келтіру Min–Max нормализациясы формуласы арқылы жүзеге асырылады:

$$X_{ij}^{norm} = \frac{X'_{ij} - \min(X')}{\max(X') - \min(X')} \quad (9)$$

мұндағы X'_{ij} — логарифмдік түрлендіруден кейін алынған белгілер матрицасы, ал X_{ij}^{norm} — қалыпқа келтірілген белгілер матрицасы, мұндағы мәндер $[0;1]$ диапазонына келтірілген.

Логарифмдік түрлендіру формуласы:

$$X'_{ij} = \log(1 + X_{ij}) \quad (10)$$

мұндағы X_{ij} — i -объектінің j -белгісінің бастапқы мәні, мұнда $X \in \mathbb{R}^n \times d$; X'_{ij} — логарифмдік түрлендіруден кейін алынған түрлендірілген мән, $X' \in \mathbb{R}^n \times d$.

Бұл кезеңде топырақтың тұзданған (Saline) және тұзданбаған (Non_saline) үлгілерінің айырмашылығын анықтау үшін екі әдіс қолданылды: Стьюденттің t -тесті және Cohen's d әсер шамасы. t -тест топтардың орташа мәндері арасындағы айырмашылықтың статистикалық мәнділігін анықтайды, ал Cohen's d айырмашылықтың әсер шамасын бағалауға мүмкіндік береді.

Стьюденттің t -тесті екі тәуелсіз топтың орташа мәндерінің айырмашылығы статистикалық тұрғыдан маңызды ма, соны тексеру үшін қолданылады. Біздің жағдайда — тұзданған және тұзданбаған топырақтар арасындағы айырмашылық:

$$t = \frac{\bar{X}_1 - \bar{X}_2}{\sqrt{\frac{s_1^2}{n_1} + \frac{s_2^2}{n_2}}} \quad (11)$$

мұндағы $\bar{X}_1, \bar{X}_2$ — топтардың орташа мәндері, s_1^2, s_2^2 — дисперсия, n_1, n_2 —

бақылаулар саны.

Топырақтың тұзданған (Saline) және тұзданбаған (Non_saline) үлгілері арасындағы айырмашылықты бағалау үшін Cohen's d әсер шамасы қолданылды. Бұл метрика екі топтың белгілер мәндерінің айырмашылығының күшін (яғни, әсер шамасын) бағалауға мүмкіндік береді. Cohen's d төмендегі формула арқылы есептеледі:

$$d = \frac{X_1 - X_2}{s_p} \quad (12)$$

мұндағы X_1 — Saline тобының орташа мәні, X_2 — Non_saline тобының орташа мәні, ал s_p — біріктірілген стандартты ауытқу (pooled standard deviation).

$$s_p = \sqrt{\frac{(n_1 - 1)s_1^2 + (n_2 - 1)s_2^2}{n_1 + n_2 - 2}} \quad (13)$$

мұндағы s_1^2 және s_2^2 — дисперсия мәндері, ал n_1 және n_2 — бақылаулар саны.

Cohen's d деректердің өлшем бірлігіне тәуелді емес және әртүрлі өлшем бірліктері бар параметрлер арасындағы айырмашылықтарды салыстыруға мүмкіндік береді. Cohen's d формуласы келесідей өрнектеледі:

$$d = \frac{\overline{X_{saline}} - \overline{X_{non\ saline}}}{s_p} \quad (14)$$

мұндағы d — топтар арасындағы әсер шамасы, $\overline{X_{saline}}$ және $\overline{X_{non\ saline}}$ — сәйкесінше тұзданған және тұзданбаған топтардың орташа мәндері, ал s_p — біріктірілген стандартты ауытқу.

Келесі кезеңде Белгілер мен мақсатты айнымалы (Y) арасындағы байланыстарды анықтау үшін Пирсон корреляция коэффициенті қолданылды:

$$\rho(X, Y) = \frac{Cov(X, Y)}{\sigma_X \cdot \sigma_Y} \quad (15)$$

мұндағы: $Cov(X, Y)$ — X пен Y арасындағы ковариация, σ_X , σ_Y — айнымалыларының стандартты ауытқулары.

Келесі кезеңде белгілер мен мақсатты айнымалы (Y) арасындағы байланыстарды анықтау үшін XGBoost алгоритмі қолданылды. Бұл әдіс градиенттік бустингке негізделген және модельдің әрбір белгіге (feature) қаншалықты тәуелді екенін бағалауға мүмкіндік береді:

$$L(y, \hat{y}) = \frac{1}{N \sum_{i=1}^N (y_i - \hat{y}_i)^2} \quad (16)$$

мұндағы y_i — мақсатты айнымалының нақты мәні, $\hat{y}_i$ — модельмен болжанған мән, ал N — бақылаулар саны.

XGBoost белгілердің маңыздылығын әрбір белгінің шығын функциясын (loss function) жақсартуға қосқан үлесі ретінде есептейді:

$$I(f_j) = \sum_{t=1}^T \Delta L_t(f_j) \quad (17)$$

мұндағы T — ағаштардың жалпы саны, $\Delta L_t(f_j)$ — t -ағашындағы f_j белгісі бойынша бөліну кезінде шығын функциясының төмендеуі.

Келесі кезеңде негізгі компоненттерді талдау (PCA) әдісі бастапқы белгілер кеңістігін өлшемділікті жоғалтпай жаңа ортогональды кеңістікке түрлендіру үшін қолданылады. Белгілер жиыны X үшін PCA келесі сызықтық түрлендіруді орындайды:

$$Z = X \cdot W \quad (18)$$

мұндағы $X \in \mathbb{R}^n \times d$ — бастапқы деректер матрицасы (N — бақылаулар саны, d — белгілер саны), $W \in \mathbb{R}^d \times d$ — ковариация матрицасының меншікті векторларының матрицасы (Σ_x), $Z \in \mathbb{R}^n \times d$ — түрлендірілген белгілер матрицасы.

Әрбір негізгі компонент PC_k дисперсияның үлесін λ_k арқылы сипаттайды, мұндағы λ_k — k -меншікті векторға сәйкес меншікті мән:

$$EVR = \frac{\lambda_k}{\sum_{j=1}^d \lambda_j} \quad (19)$$

мұндағы λ_k — k -компоненттің меншікті мәні, d — жалпы компоненттер саны.

Бұл кезеңде модельді оқыту үшін XGBoost алгоритмі қолданылады. Модель түрлендірілген белгілер кеңістігі Z негізінде топырақтың тұздану ықтималдығын ($\hat{y}$) болжауға үйретіледі:

$$\hat{y} = XGB(Z) \quad (20)$$

Модельді оқыту квадратикалық қателікті минимизациялауға негізделеді:

$$L(\hat{y}, y) = \frac{1}{N} \sum_{i=1}^N (y_i - \hat{y}_i)^2 \quad (21)$$

мұндағы y — нормаланған мақсатты айнымалы, $\hat{y}$ — тұздану ықтималдығының болжанған мәні, N — бақылаулар саны.

Бұл кезеңде модельдің дәлдігін бағалау үшін келесі метрикалар қолданылады:

$$MSE = \frac{1}{N} \sum_{i=1}^N (y_i - \hat{y}_i)^2 \quad (22)$$

Детерминация коэффициенті (R^2):

$$R^2 = 1 - \frac{\sum_{i=1}^N (y_i - \hat{y}_i)^2}{\sum_{i=1}^N (y_i - \bar{y})^2} \quad (23)$$

мұндағы $\bar{y}$ — y айнымалысының орташа мәні.

Қорытынды кезеңде тұздану ықтималдығын болжау үшін көпқадамды модель қолданылады. Модельдің жалпы құрылымы келесідей өрнектеледі:

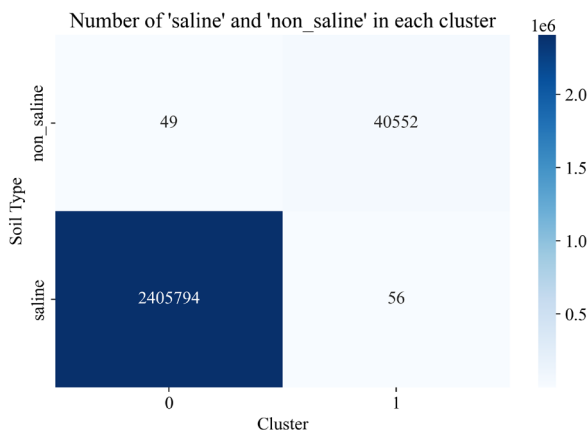
$$\hat{y} = XGB \left(PCA \left(\ln(1 + MinMax(X)) \right) \right) \quad (24)$$

Мұндағы X — бастапқы спектралдық және гидрологиялық белгілер жиыны, $MinMax(X)$ — белгілердің нормаланған мәндері, $\ln(1 + MinMax(X))$ — нормаланған белгілердің логарифмдік түрлендіруі, PCA — негізгі компоненттер әдісі (Principal Component Analysis) арқылы жаңа кеңістікке түрлендіру, ал XGB — тұздану ықтималдығын ($\hat{y}$) болжауға арналған градиенттік бустинг моделі.

Зерттеуде Sentinel-2 мультиспектрлік суреттері мен ERA5-Land климаттық деректері пайдаланылды. Зерттеу объектісі ретінде тұздылық деңгейі әртүрлі үш аймақ таңдалды: Арал теңізінің бұрынғы табаны, Бозайғыр ауылы және құмды бақылау аймағы. Алынған деректер алдын ала логарифмдік түрлендіру және Min-Max нормализация әдістері арқылы өңделді. Кейін PCA әдісі өлшемділікті азайту үшін, ал XGBoost моделі тұздану ықтималдығын болжау үшін қолданылды. Есептеулер Python тілінде TensorFlow, XGBoost және Scikit-learn кітапханалары көмегімен жүргізілді. Модельдің тиімділігі MSE және R^2 метрикалары бойынша бағаланды.

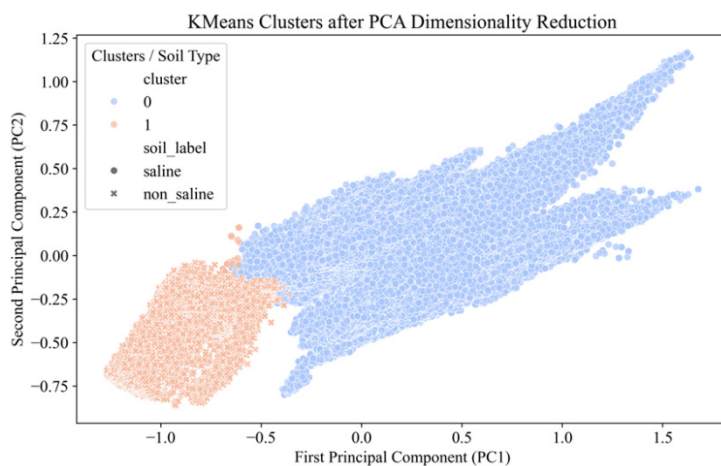
Нәтижелер және талқылау.

Ұсынылған әдіс топырақтың тұздануын болжау мен кеңістіктік жіктеуде жоғары тиімділікті көрсетті. Модель Sentinel-2 мультиспектрлік суреттері мен ERA5-Land климаттық деректерін біріктіріп, топырақтың спектралдық және гидрологиялық қасиеттерін кешенді түрде талдауға мүмкіндік берді. MSI сенсорының 10 метрлік ажыратымдылығы бар B2–B12 диапазондары өсімдік жамылғысы мен ылғалдылық көрсеткіштерін дәл сипаттады. Алынған SI1–SI5, NDVI, NDWI, NDSI және BI индекстері тұздану деңгейін анықтауда маңызды рөл атқарды. Алынған мәліметтерді терең талдау үшін K-Means кластерлеу әдісі қолданылып, топырақ үлгілері екі негізгі топқа — тұзданған (saline) және тұзданбаған (non_saline) кластерлерге бөлінді. 1-суретте K-Means алгоритмі арқылы анықталған кластерлер бойынша тұзданған және тұзданбаған топырақтардың таралуын көрсететін жылу картасы (heatmap) ұсынылған. Картада әрбір ұяшық белгілі бір кластерге жататын пиксельдердің санын бейнелейді. Нәтижелерге сәйкес, кластер 0 негізінен тұзданған топырақтарға, ал кластер 1 тұзданбаған топырақтарға сәйкес келеді. Кестеде көрсетілгендей, кластер 0 құрамында 2 405 794 тұзданған пиксель және 49 тұзданбаған пиксель бар, ал кластер 1 құрамында 40 552 тұзданбаған және 56 тұзданған пиксель кездеседі. Бұл нәтиже K-Means алгоритмінің тұздану дәрежесін ажыратуда жоғары дәлдікке ие екенін және екі кластердің нақты шекарамен бөлінетінін дәлелдейді.



Сур. 1. K-Means кластерлеу нәтижесінде алынған тұзданған және тұзданбаған топырақтардың таралу картасы.

Көрсетілгендей, тұзданған және тұзданбаған топырақтар нақты екі кластерге бөлінеді, бұл олардың спектралдық және гидрологиялық айырмашылықтарын дәлелдейді. Келесі кезеңде PCA (Principal Component Analysis) әдісі қолданылып, алынған деректер екі басты компонент (PC1 және PC2) бойынша визуализацияланды, бұл Sentinel-2 MSI суреттері арқылы тұздану деңгейін бағалаудың тиімділігін көрсетті (Tashpolat & Reheman, 2025). 2-суретте PCA (Principal Component Analysis) әдісі қолданылып, алынған деректер екі басты компонент (PC1 және PC2) бойынша визуализацияланды. Бұл әдіс жоғары өлшемді деректердің құрылымын екі өлшемде көрсетуге және олардың ішкі байланыстарын түсінуге мүмкіндік береді. 2-суретте PCA нәтижелерінің негізінде K-Means кластерлеу алгоритмі арқылы бөлінген топырақ үлгілерінің таралуы көрсетілген. Ось X бірінші басты компонентті (PC1), ал ось Y екінші басты компонентті (PC2) білдіреді. Нүктелердің түсі кластер нөміріне (0 және 1), ал маркерлердің пішіні нақты топырақ түріне (Saline және Non_saline) сәйкес келеді.



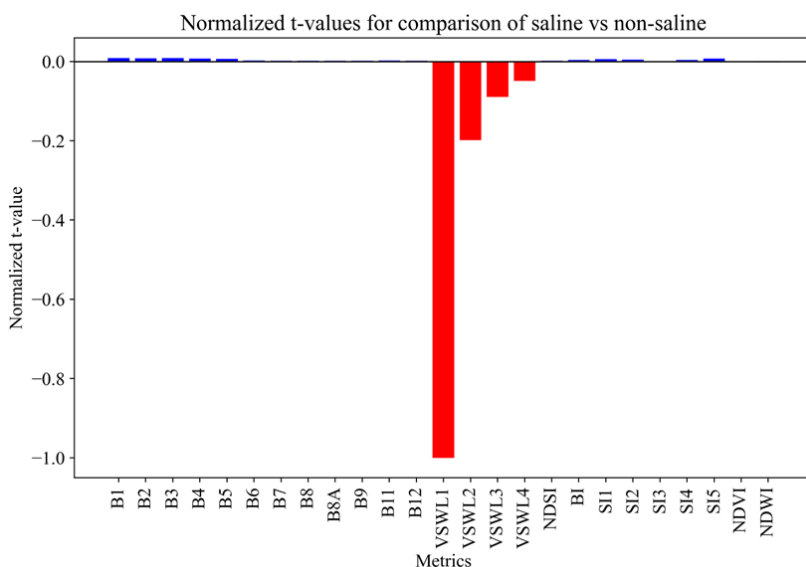
Сур. 2. PCA нәтижелері негізінде алынған K-Means кластерлерінің визуализациясы.

Графиктен байқағандай, тұзданбаған (Non_saline) топырақтар



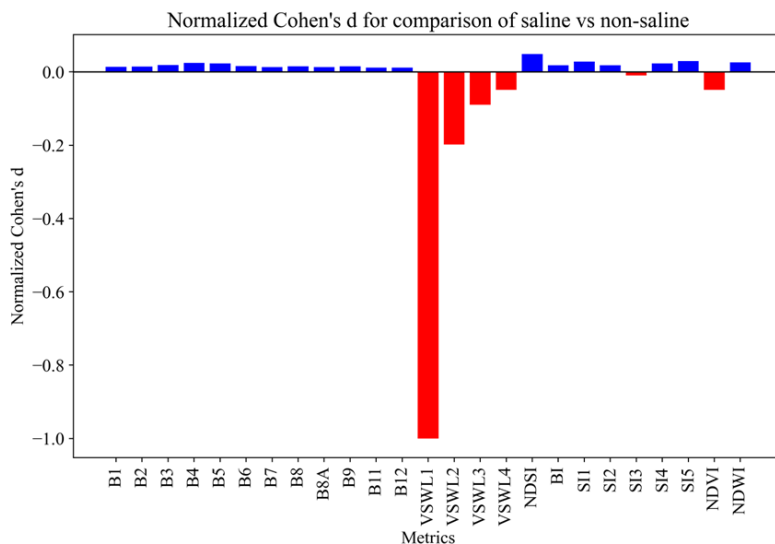
диаграмманың сол жағында, ал тұзданған (Saline) топырақтар оң жағында орналасқан, бұл олардың спектралдық және гидрологиялық айырмашылықтарының айқын екенін дәлелдейді. Сонымен қатар, тұзданған топырақ үлгілерінің таралуы анағұрлым кең, бұл олардың спектралдық көрсеткіштер мен ылғалдылық бойынша жоғары өзгергіштігін көрсетеді. Осылайша, PCA және K-Means әдістерін біріктіру топырақ типтерінің табиғи айырмашылықтарын тиімді анықтауға мүмкіндік береді.

3-суретте тұзданған (Saline) және тұзданбаған (Non_saline) топырақ үлгілерінің айырмашылығын көрсету үшін t-тест нәтижелерінің нормаланған мәндері берілген. Диаграмма екі топтың спектралдық және гидрологиялық параметрлері бойынша статистикалық айырмашылығын көрсетеді. Графиктен байқалғандай, B1–B12, SI1–SI5, BI, NDWI және NDSI индекстері оң t-мәндерге ие, яғни олардың мәні тұзданған топырақтарда жоғары. Ал VSWL1–VSWL4, NDVI және SI3 индекстері теріс мәнге ие, бұл олардың тұзданбаған топырақтарда жоғары екенін білдіреді. Бұл айырмашылықтар топырақтың физикалық және химиялық қасиеттерінің айқын ерекшеліктерін дәлелдейді.



Сур. 3. Тұзданған (Saline) және тұзданбаған (Non_saline) топырақ үлгілерінің салыстырмалы t-мәндері.

4-суретте тұзданған (Saline) және тұзданбаған (Non_saline) топырақ үлгілерінің арасындағы айырмашылықтарды сипаттайтын Cohen's d мәндерінің нормаланған диаграммасы көрсетілген. Бұл көрсеткіш екі топ арасындағы айырмашылықтың шамасын анықтауға мүмкіндік береді. B1–B12, SI1–SI5, BI, NDWI және NDSI параметрлері оң мәндерге ие болып, тұзданған топырақтарда жоғары екенін көрсетеді, ал VSWL1–VSWL4, NDVI және SI3 теріс мәндерге ие, бұл олардың тұзданбаған топырақтарда жоғары екенін білдіреді. Осылайша, Cohen's d әдісі топырақтардың физикалық және спектралдық қасиеттері арасындағы айқын айырмашылықтарды сандық тұрғыдан дәлелдейді.



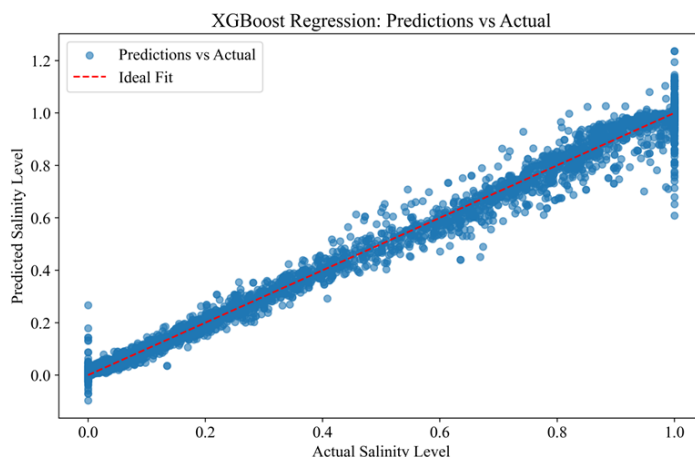
Сур. 4. Тұзданған (Saline) және тұзданбаған (Non_saline) топырақ үлгілерінің салыстырмалы Cohen's d мәндері

4-суретте көрсетілгендей, тұзданған және тұзданбаған топырақтардың арасындағы айырмашылықтар айқын көрінеді. Көрсетілгендей, тұзданған топырақтарда спектралдық индекстердің мәндері жоғары, ал тұзданбаған топырақтарда ылғалдылық және өсімдік индексі (NDVI) жоғары. Бұл нәтижелер Cohen's d әдісінің топырақтардың физикалық және спектралдық қасиеттеріндегі айырмашылықтарды тиімді анықтай алатынын дәлелдейді.

Алынған статистикалық талдау нәтижелері топырақ тұздылығының негізгі белгілерін анықтауға мүмкіндік берді. Келесі кезеңде осы белгілер XGBoost моделі арқылы тұздылық деңгейін болжау үшін пайдаланылды.

5-суретте XGBoost моделінің нақты (Actual) және болжамды (Predicted) тұздылық деңгейлері арасындағы тәуелділік көрсетілген. График нүктелер түрінде модельдің болжау нәтижелерін және қызыл пунктир сызықпен идеалды сәйкестік сызығын бейнелейді. Көрсетілгендей, нүктелердің басым бөлігі бұл сызыққа жақын орналасқан, бұл XGBoost моделінің жоғары дәлдікпен жұмыс істейтінін дәлелдейді. Дегенмен, төмен және жоғары диапазондарда аздаған ауытқулар байқалады, бұл модельдің шеткі мәндерде қателігі бар екенін көрсетеді. Жалпы алғанда, XGBoost моделі тұздылық деңгейін болжауда жоғары тиімділікті көрсетті.

XGBoost моделінің нақты (Actual) және болжамды (Predicted) тұздылық деңгейлері арасындағы тәуелділік көрсетілген. Бұл график модель болжаған мәндер мен нақты мәндердің өзара сәйкестігін нүктелер түрінде бейнелейді және қызыл пунктир сызық идеалды сәйкестікті білдіреді. Көрсетілгендей, нүктелердің басым бөлігі бұл сызыққа жақын орналасқан, бұл XGBoost моделінің жоғары дәлдікпен жұмыс істейтінін дәлелдейді.

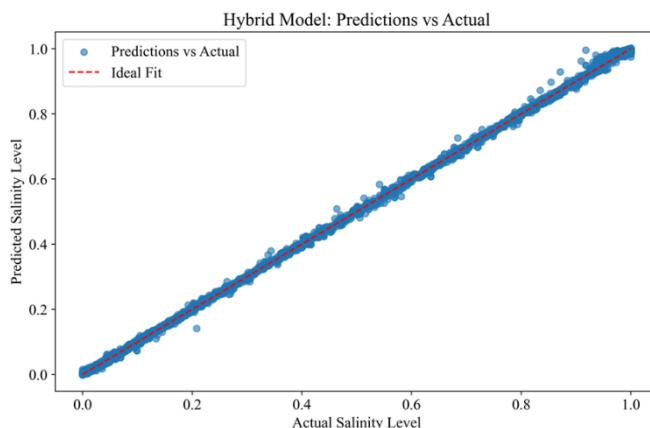


Сур. 5. XGBoost моделінің нақты және болжамды тұздылық деңгейлерін салыстыру диаграммасы.

Алайда төмен және жоғары диапазондарда аздаған ауытқулар байқалады, бұл модельдің шеткі мәндерде қателігі бар екенін көрсетеді. Орташа квадраттық қателік (MSE) мәні 0.0123 құрап, қанағаттанарлық нәтижені көрсетті, ал детерминация коэффициенті (R^2) болжау дәлдігінің жоғары екенін растады. Бұл нәтижелер XGBoost моделінің регрессиялық есептерді тиімді шешуге қабілетті екенін дәлелдейді. Дегенмен, модель PCA немесе логарифмдік түрлендіру сияқты қосымша өңдеу әдістерін пайдаланбағандықтан, оның жетілдіру әлеуеті сақталады. Жалпы алғанда, XGBoost әдісі маңызды белгілерді анықтауда жоғары тиімділік танытты және болжау дәлдігін одан әрі арттыру күрделірек гибридік тәсілдерді қолдану арқылы мүмкін екенін көрсетті.

6-суретте гибридік модельдің нәтижелері көрсетілген. Бұл модель XGBoost алгоритмін логарифмдік түрлендіру, корреляциялық талдау және басты компоненттер әдісі (PCA) сияқты алдын ала өңдеу тәсілдерімен біріктіру арқылы жетілдірілді. Мұндай тәсіл базалық XGBoost моделінің шектеулерін жою және болжау дәлдігін арттыру мақсатында әзірленді. Графикте болжамды (Predicted) және нақты (Actual) тұздылық деңгейлері арасындағы тәуелділік бейнеленген. Көрсетілгендей, нүктелердің басым бөлігі идеалды сәйкестік сызығына (қызыл пунктир) өте жақын орналасқан, бұл гибридік модельдің жоғары дәлдікпен жұмыс істейтінін дәлелдейді. Алынған нәтижелер MSE мәнінің айтарлықтай төмендегенін және R^2 көрсеткішінің жақсарғанын көрсетті, бұл модельдің топырақ тұздылығын болжаудағы тиімділігін растайды.

Көрсетілгендей, графикте болжау нәтижелері (Predicted) мен нақты тұздылық мәндері (Actual) арасындағы тәуелділік бейнеленген. Болжау нүктелері базалық XGBoost моделіне қарағанда идеалды сәйкестік сызығына (қызыл пунктир) айтарлықтай жақын орналасқан, бұл гибридік модельдің жоғары дәлдігін көрсетеді. Гибридік модель үшін орташа квадраттық қате (MSE) 0.0091 мәнін құрады, бұл XGBoost моделіне қарағанда шамамен 26%-ға төмен. .

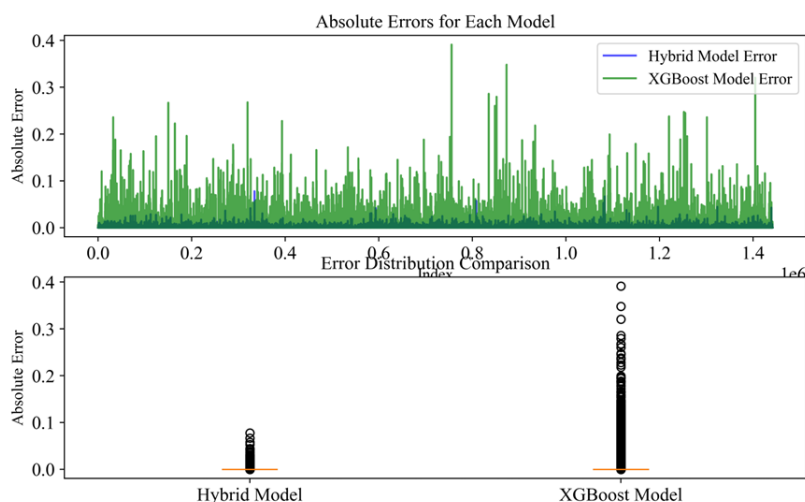


Сур. 6. Гибридті модельдің нақты және болжамды тұздылық деңгейлерін салыстыру диаграммасы.

Сонымен қатар, детерминация коэффициенті (R^2) жақсарып, модельдің деректер дисперсиясының басым бөлігін сәтті түсіндіретінін растады. Гибридті модельдің ерекшелігі – басты компоненттер әдісін (PCA) пайдалану, ол бастапқы белгілерді жаңа кеңістікке түрлендіріп, олардың толық өлшемділігін сақтауға мүмкіндік берді. Бұл тәсіл деректердің интерпретациясын жақсартты және модельге белгілер арасындағы тәуелділіктерді неғұрлым тиімді анықтауға мүмкіндік берді. Бұдан бөлек, логарифмдік түрлендіру шеткі мәндердің әсерін азайтып, болжау сапасын арттырды. Графиктен шеткі диапазондардағы ауытқулардың азайғаны және нүктелердің басым көпшілігінің идеалды сәйкестік сызығы бойында шоғырланғаны анық байқалады.

7-суретте гибридті және XGBoost модельдерінің абсолюттік қателіктерінің салыстырмалы графигі көрсетілген. Графиктен көрініп тұрғандай, гибридті модельде қателік мәндері біршама төмен және біркелкі таралған, ал XGBoost моделінде жоғары амплитудалы тербелістер мен шеткі мәндер жиірек кездеседі. Бұл гибридті тәсілдің болжам тұрақтылығын арттырып, модельдің жалпы өнімділігін жақсартқанын көрсетеді. Voxplot диаграммалары да гибридті модельде орташа және медианалық қателіктердің аз екенін айқын көрсетеді. Бұл нәтиже гибридті тәсілдің шулы және өзгермелі деректермен жұмыс істеуде анағұрлым тиімді екенін дәлелдейді.

Көрсетілгендей, гибридті және XGBoost модельдерінің қателіктерін салыстыру нәтижелері гибридті тәсілдің айқын артықшылығын көрсетті. Гибридті модельдің орташа абсолюттік және квадраттық қателік мәндері төмен болып, болжам дәлдігі мен тұрақтылығын арттырды. Бұл нәтижелер модельдің шулы және күрделі деректермен тиімді жұмыс істей алатынын дәлелдейді. Осылайша, жүргізілген талдау нәтижелері ұсынылған гибридті модельдің топырақтың тұздану деңгейін болжауда жоғары дәлдік пен тұрақтылыққа ие екенін көрсетті. Осылайша, жүргізілген талдау нәтижелері ұсынылған гибридті модельдің топырақтың тұздану деңгейін болжауда жоғары дәлдік пен тұрақтылыққа ие екенін көрсетті.



Сур. 7. Гибридті және XGBoost модельдерінің абсолюттік қателіктерінің салыстырмалы графигі.

Гибридті тәсіл спектралдық және гидрологиялық деректерді біріктіре отырып, дәстүрлі XGBoost моделіне қарағанда болжам сапасын айтарлықтай жақсартты. Нәтижелер MAE және RMSE қателерінің төмен мәндерімен, ал R^2 көрсеткішінің жоғары болуымен расталды. Сонымен қатар, PCA және корреляциялық талдау сияқты алдын ала өңдеу әдістерін қолдану модельдің бейімделу қабілетін арттырып, тұзданған және тұзданбаған топырақтар арасындағы айырмашылықты неғұрлым дәл сипаттауға мүмкіндік берді. Жалпы алғанда, ұсынылған модель кеңістіктік жіктеу және тұздылықты сандық бағалау міндеттерін шешуде тиімді және перспективалы құрал болып табылады.

Қорытынды

Зерттеу барысында Sentinel-2 спутниктік мультиспектрлік деректері мен ERA5-Land гидрологиялық параметрлерін біріктіру арқылы топырақтың тұздылығын кешенді бағалау жүргізілді (Zhao et al., 2024; Hershbach et al., 2023). Бұл тәсіл тұзданған (Saline) және тұзданбаған (Non_saline) топырақтардың айырмашылықтарын сипаттайтын негізгі заңдылықтарды анықтауға мүмкіндік берді (Jiang et al., 2025). t-тест пен Cohen's d әсер шамасы арқылы жүргізілген статистикалық талдау спектралдық индекстердің (NDSI, SI4, BI) және топырақ ылғалдылығының параметрлерінің (VSWL1–VSWL4) топырақ тұздылығын анықтайтын негізгі факторлар екенін көрсетті (Cohen, 1988). Тұзданған топырақтарда спектралдық индекстердің жоғары мәндері және ылғалдың төмен деңгейі байқалса, тұзданбаған топырақтарда керісінше NDVI мәні жоғары және ылғалдылығы жақсы болды (Cui et al., 2025).

Басты компоненттер әдісін (PCA) қолдану деректердің өзгергіштігін сипаттайтын екі негізгі бағытты анықтауға мүмкіндік берді (Jolliffe & Cadima, 2016; Tashpolat & Reheman, 2025): гидрологиялық және спектралдық. Бұл тәсіл K-Means кластерлеу әдісі арқылы екі топты (тұзданған және тұзданбаған)

98%-дан астам дәлдікпен ажыратуға мүмкіндік берді (Becker et al., 2025). Келесі кезеңде XGBoost алгоритміне негізделген гибриді модель әзірленіп, логарифмдік түрлендіру, корреляциялық талдау және PCA сияқты алдын ала өңдеу әдістері қолданылды (Chen & Guestrin, 2016; Wang & Xu, 2023). Бұл модель базалық нұсқамен салыстырғанда орташа квадраттық қателікті (MSE) 26%-ға төмендетіп, тұздылықтың шеткі мәндерін болжаудағы дәлдігін арттырды.

Гидрологиялық параметрлер мен спектралдық көрсеткіштерді біріктіру модельдің дәлдігін және интерпретациясын жақсартты (Gao & Xu, 2025), ал тұздылық пен ылғалдылық арасындағы күрделі тәуелділіктерді анықтауға мүмкіндік берді. Сонымен қатар, модельге енгізілген бұлдыр логика (fuzzy logic) тұздылық деңгейлерінің шекараларын икемді түрде анықтауға жағдай жасап, оны аймақтық айырмашылықтарға бейімдеді (Li et al., 2022).

Осылайша, ұсынылған гибриді тәсіл топырақ тұздылығын бақылау мен болжауда тиімділігін дәлелдеді. Ол жоғары дәлдікпен автоматты классификация жүргізіп, шулы деректермен де тұрақты жұмыс істеуге мүмкіндік береді. Ұсынылған әдіс экологиялық мониторинг, жер ресурстарын басқару және агроэкологиялық зерттеулер салаларында қолдануға болатын әмбебап құрал ретінде ерекшеленеді (Luo et al., 2025).

REFERENCES

- Becker, S.J., Maloney, M.C., Griffin, A.W., Lasko, K. & Sussman, H.S. (2025). Bare ground classification using a spectral index ensemble and machine learning models optimized across 12 international study sites // *Geocarto International*. — 2025. — Vol. 40. — No. 1. — Article 2465452. DOI: 10.1080/10106049.2023.2465452.
- Bo, Q., Lv, P., Wang, Z., Wang, Q., & Li, Z. (2024). Prediction of the post-mining land use based on random forest and DBSCAN // *PLoS ONE*. — 2024. — Vol. 19. — No. 1. — Article e0287079. DOI: 10.1371/journal.pone.0287079.
- Chen, T., & Guestrin, C. (2016). XGBoost: A scalable tree boosting system // *Proceedings of the 22nd ACM SIGKDD International Conference on Knowledge Discovery and Data Mining*. — 2016. — Pp. 785–794. DOI: 10.1145/2939672.2939785.
- Cohen, J. (1988). *Statistical power analysis for the behavioral sciences* (2nd ed.). — Lawrence Erlbaum Associates.
- Copernicus Open Access Hub. (2025). Sentinel-2 User Guide // European Space Agency (ESA). — 2025. — URL: <https://sentiwiki.esa.int/sentinel-2>.
- Cui, G., Liu, Y., Li, X., Wang, S., Qu, X., Wang, L., & Zhang, W. (2025). Impacts of groundwater storage variability on soil salinization in a semi-arid agricultural plain // *Geoderma*. — 2025. — Vol. 454. — Article 117162.
- Gao, L., & Xu, E. (2025). Mapping cropland soil salinity using multi-cycle classification to mitigate retrieval errors // *Computers and Electronics in Agriculture*. — 2025. — Vol. 231. — Article 110055. DOI: 10.1016/j.compag.2024.110055.
- Hersbach, H., Bell, B., Berrisford, P., et al. (2023). ERA5-Land hourly data from 1950 to present // Copernicus Climate Change Service (C3S) Climate Data Store (CDS). — 2023. — DOI: 10.24381/cds.e2161bac.
- Jiang, Z., Ding, J., Li, Z., & Liu, J. (2025). Present knowledge and future challenges in remote sensing for soil salinization monitoring: A review of bibliometric analysis // *International Journal of Remote Sensing*. — 2025. — Vol. 46. — No. 1. — Pp. 247–272. DOI: 10.1080/01431161.2024.2412804.
- Jolliffe, I.T., & Cadima, J. (2016). Principal component analysis: A review and recent developments // *Philosophical Transactions of the Royal Society A*. — 2016. — Vol. 374. — No. 2065. — Article 20150202. DOI: 10.1098/rsta.2015.0202.
- Li, H., Zhang, J., & Ren, S. (2022). Fuzzy logic approach for soil salinity classification using remote sensing data // *Catena*. — 2022. — Vol. 210. — Article 105933. DOI: 10.1016/j.catena.2021.105933.
- Luo, Z., Deng, M., Tang, M., Liu, R., Feng, S., Zhang, C., & Zheng, Z. (2025). Estimating soil profile salinity



under vegetation cover based on UAV multi-source remote sensing // Scientific Reports. — 2025. — Vol. 15. — No. 1. — Article 2713. DOI: 10.1038/s41598-024-40157-9.

Tashpolat, N., & Rehemat, A. (2025). Monitoring of soil salinity in the Weiku Oasis based on feature space models derived from Sentinel-2 MSI images // Land. — 2025. — Vol. 14. — No. 2. — Article 251. DOI: 10.3390/land14020251.

Wang, S., & Xu, D. (2023). Hybrid models integrating PCA and XGBoost for soil salinity prediction // Environmental Science and Pollution Research. — 2023. — Vol. 30. — No. 6. — Pp. 15012–15026.

Zhao, F., Liu, Y., & Zhang, C. (2024). Multi-source data fusion for soil salinity assessment using ERA5 and Sentinel-2 datasets // Remote Sensing Applications: Society and Environment. — 2024. — Vol. 34. — Article 101102.



**ХАЛЫҚАРАЛЫҚ АҚПАРАТТЫҚ ЖӘНЕ
КОММУНИКАЦИЯЛЫҚ ТЕХНОЛОГИЯЛАР ЖУРНАЛЫ**

**МЕЖДУНАРОДНЫЙ ЖУРНАЛ ИНФОРМАЦИОННЫХ И
КОММУНИКАЦИОННЫХ ТЕХНОЛОГИЙ**

**INTERNATIONAL JOURNAL OF INFORMATION AND
COMMUNICATION TECHNOLOGIES**

Правила оформления статьи для публикации в журнале на сайте:

<https://journal.iitu.edu.kz>

ISSN 2708–2032 (print)

ISSN 2708–2040 (online)

Собственник: АО «Международный университет
информационных технологий» (Казахстан, Алматы)

ОТВЕТСТВЕННЫЙ РЕДАКТОР
Мрзабаева Раушан Жалиқызы

НАУЧНЫЙ РЕДАКТОР
Ермакова Вера Александровна

ТЕХНИЧЕСКИЙ РЕДАКТОР
Рашидинов Дамир Рашидинович

КОМПЬЮТЕРНАЯ ВЕРСТКА
Асанова Жадыра

Подписано в печать 15.12.2025.

Формат 60x881/8. Бумага офсетная. Печать - ризограф. 9,0 п.л. Тираж 100
050040 г. Алматы, ул. Манаса 34/1, каб. 709, тел: +7 (727) 244-51-09).

Издание Международного университета информационных технологий
Издательский центр КБТУ, Алматы, ул. Толе би, 59