

ства им. И. Жахаева», член-корреспондент НААН РК, Республика Казахстан, 120014, г. Кызылорда, проспект Абая 256, тел.: 87017363283, e-mail: b.zhanuzak63@gmail.com.

Жусупова Лиза Куанышовна – PhD по образовательной программе «Водное хозяйство и землеустройство», старший преподаватель, НАО «Кызылординский университет имени Коркыт Ата», Республика Казахстан, 120014, г. Кызылорда, ул. Есим Хан, 23В/17, тел.: 87002328464, e-mail: Liza_zk@mail.ru.

Алдамбергенова Гульзинат Темирхановна – магистр, старший преподаватель образовательной программы «Водное хозяйство и землеустройство», НАО «Кызылординский университет имени Коркыт Ата», Республика Казахстан, 120014, г. Кызылорда, ул. Айтекеби, 29а, тел.: 87753966162, e-mail: gulzi_31@mail.ru.

Олжабаева Аксауле Ондасиновна* – «Су шаруашылығы және жерге орналастыру» БББ PhD, аға оқытушысы, «Қорқыт Ата атындағы Қызылорда университеті» КЕАҚ, Қазақстан Республикасы, 120014, Қызылорда қ, Сол жағалау 16/28, тел.: 87075801624, e-mail: Seul379@mail.ru.

Байманов Жанузак Нурдилдаевич – т.ғ.к., доцент, Басқарма Төрағасының ғылыми жұмыс жөніндегі орынбасары, Ы.Жахаев атындағы Қазақ күріш ғылыми-зерттеу институты, ҚР ҰАҒА корреспондент-мүшесі, Қазақстан Республикасы, 120014, Қызылорда қ, Абай даңғ 256, тел.: 87017363283, e-mail: b.zhanuzak63@gmail.com.

Жусупова Лиза Куанышовна – Су шаруашылығы және жерге орналастыру» БББ PhD, аға оқытушысы, «Қорқыт Ата атындағы Қызылорда университеті» КЕАҚ, Қазақстан Республикасы, Кызылорда қ, Есим Хан 23В/17, тел.: 87002328464, Liza_zk@mail.ru.

Алдамбергенова Гүлзинат Темірханқызы – магистр, «Су шаруашылығы және жерге орналастыру» БББ-ның аға оқытушысы, «Қорқыт Ата атындағы Қызылорда университеті» КЕАҚ, Қазақстан Республикасы, 120014, Қызылорда қ., Әйтеке би көш, 29А., тел.: 8 7753966162, e-mail: gulzi_31@mail.ru.

Olzhabayeva Aksaule Ondassynovna* – PhD, “Water Resources Management and Land Use Planning” educational program, Senior Lecturer, Korkyt Ata Kyzylorda University NLC, Republic of Kazakhstan, 120014, Kyzylorda, 16/28 Levyi Bereg, tel.: 8707580 1624, e-mail: Seul379@mail.ru.

Baimanov Zhanuzak Nurdildayevich – Candidate of Technical Sciences, Associate Professor, Deputy Chairman of the Management Board for Research, I.Zhakhayev Kazakh Research Institute of Rice Cultivation, Corresponding Member of the National Academy of Agrarian Sciences of the Republic of Kazakhstan, Republic of Kazakhstan, 120014, Kyzylorda, 25b Abai Ave., tel.: 87017363283, e-mail: b.zhanuzak63@gmail.com.

Zhussupova Liza Kuanyshovna – PhD, “Water Resources Management and Land Use Planning” educational program, Senior Lecturer, Korkyt Ata Kyzylorda University NLC, Republic of Kazakhstan, 120014, Kyzylorda, 23B/17 Yessim Khan Str., tel.: 87002328464, e-mail: Liza_zk@mail.ru.

Aldambergenova Gulzinat Temirkhanovna – Master, Senior Lecturer, “Water Resources Management and Land Use Planning” educational program, Korkyt Ata Kyzylorda University NLC, Republic of Kazakhstan, 120014, Kyzylorda, 29a Aiteke bi Str., tel.: 87753966162, e-mail: gulzi_31@mail.ru.

МРНТИ 38.61.05: 38.61.27

УДК 004.42,556.3.04

<https://doi.org/10.52269/SEPT2631193>

КАРТИРОВАНИЕ ПОТЕНЦИАЛА ПОДЗЕМНЫХ ВОД С ПРИМЕНЕНИЕМ СПУТНИКОВЫХ ДАННЫХ И АЛГОРИТМА МАШИННОГО ОБУЧЕНИЯ НА ПРИМЕРЕ ИЛИЙСКОГО РАЙОНА АЛМАТИНСКОЙ ОБЛАСТИ ЮЖНОГО КАЗАХСТАНА

Оңласынов Ж.Ә.* – PhD, заведующий лабораторией ГИС-технологий и ДЗЗ, «Институт гидрогеологии и геоэкологии им У.М. Ахмедсафина, Satbayev University», г. Алматы, Республика Казахстан.

Абсаметов М.К. – доктор геолого-минералогических наук, профессор, директор, «Институт гидрогеологии и геоэкологии им У.М. Ахмедсафина, Satbayev University», г. Алматы, Республика Казахстан.

Муртазин Е.Ж. – кандидат геолого-минералогических наук, заместитель директора по науке, «Институт гидрогеологии и геоэкологии им У.М. Ахмедсафина, Satbayev University», г. Алматы, Республика Казахстан.

Муратова М.М. – ведущий инженер лаборатории ГИС-технологий и ДЗЗ, «Институт гидрогеологии и геоэкологии им У.М. Ахмедсафина, Satbayev University», г. Алматы, Республика Казахстан.

В настоящем исследовании применяется интегрированный подход, основанный на совместном использовании данных дистанционного зондирования и методов машинного обучения для прогнозирования пространственного распределения потенциальных зон подземных вод. В качестве основного алгоритма классификации выбран метод «случайного леса» (Random Forest), который относится к методам обучения с учителем и демонстрирует высокую устойчивость к шуму входных данных.

Общая схема исследования включает четыре основных этапа: формирование входных пространственных переменных; подготовка обучающей выборки; обучение и настройка модели Random Forest; валидация и оценка точности результатов. В качестве входных переменных использованы спектральные индексы: NDVI, NDWI; морфометрические параметры: уклон (Slope), высота (DEM); гидрологический фактор: расстояние до водных объектов – Эвклидово расстояние (Distance to Rivers). В качестве обучающих данных: точки водозаборных сооружений по Илийскому району Алматинской области.

Для моделирования потенциала подземных вод был использован алгоритм Random Forest, реализованный в среде Python с использованием библиотеки Scikit-learn. В качестве предикторов использовались спутниковые и геоморфометрические данные, которые были обработаны в ПО ArcGIS. Все переменные были приведены к единому пространственному разрешению и системе координат. Для обеспечения сопоставимости данных выполнена нормализация значений, что позволило снизить влияние различий в диапазонах признаков на процесс обучения модели. Обученная модель была применена ко всей исследуемой территории с использованием метода наложения растровых изображений, в результате чего была получена пространственно непрерывная карта потенциала грунтовых вод, классифицированная на зоны низкого, среднего и высокого потенциала.

Ключевые слова: машинное обучение, Random Forest, дистанционное зондирование, сельское хозяйство, подземные воды.

СПУТНИКТІК ДЕРЕКТЕР МЕН МАШИНАЛЫҚ ОҚЫТУ АЛГОРИТМІН ПАЙДАЛАНЫП ЖЕР АСТЫ СУЛАРЫНЫҢ ӘЛЕУЕТІН КАРТАҒА ТҮСІРУ: ОҢТҮСТІК ҚАЗАҚСТАН, АЛМАТЫ ОБЛЫСЫ, ІЛЕ АУДАНЫНЫҢ ЖАҒДАЙЫН ЗЕРТТЕУ

Оңласынов Ж.Ә.* – PhD, ГАЖ технологиялары және қашықтықтан зондтау зертханасының меңгерушісі, «Ұ.М. Ахмедсафин атындағы гидрогеология және геоэкология институты, Satbayev University», Алматы қ., Қазақстан Республикасы.

Абсаметов М.К. – геология-минералогия ғылымдарының докторы, профессор, «Ұ.М. Ахмедсафин атындағы Гидрогеология және геоэкология институтының директоры, Сәтбаев университеті», Алматы қ., Қазақстан Республикасы.

Мұртазин Е.Ж. – геология-минералогия ғылымдарының кандидаты директорының ғылым жөніндегі орынбасары, «Ұ.М. Ахмедсафин атындағы гидрогеология және геоэкология институты, Satbayev University», Алматы қ., Қазақстан Республикасы.

Муратова М.М. – ЖҚЗ және ГАЖ технологиялары лабораториясының бас инженері, «Ұ.М. Ахмедсафин атындағы гидрогеология және геоэкология институты, Satbayev University», Алматы қ., Қазақстан Республикасы.

Бұл зерттеу жер асты суларының ықтимал аймақтарының кеңістіктік таралуын болжау үшін қашықтықтан зондтау деректері мен машиналық оқыту әдістерін біріктіріп пайдалануға негізделген интеграцияланған тәсілді қолданады. Негізгі жіктеу алгоритмі ретінде кіріс деректерінің шуылына жоғары беріктік көрсететін бақыланатын оқыту әдісі болып табылатын Random Forest таңдалды.

Жалпы зерттеу дизайны төрт негізгі кезеңнен тұрады: кіріс кеңістіктік айнымалыларын генерациялау; оқыту жиынтығын дайындау; Random Forest моделін оқыту және баптау; және нәтижелердің дәлдігін тексеру және бағалау. Кіріс айнымалыларына спектрлік индекстер (NDVI, NDWI); морфометриялық параметрлер (көлбеу, DEM); және гидрологиялық фактор (өзендерге дейінгі қашықтық) кірді. Оқыту деректеріне Алматы облысының Іле ауданындағы су алу нысандарының орналасуы кірді.

Жер асты суларының әлеуетін модельдеу үшін Scikit-learn кітапханасын пайдаланып Python тілінде Random Forest алгоритмі енгізілді. Спутниктік және геоморфометриялық деректер болжаушылар ретінде пайдаланылды және ArcGIS бағдарламалық жасақтамасында өңделді. Барлық айнымалылар жалпы кеңістіктік ажыратымдылық пен координат жүйесіне түрлендірілді. Деректердің салыстырмалылығын қамтамасыз ету үшін мәндер қалыпқа келтірілді, бұл модельді оқыту процесіне ерекшелік диапазонындағы айырмашылықтардың әсерін азайтты. Дайындалған модель растрлық қабаттасу арқылы бүкіл зерттеу аймағына қолданылды, нәтижесінде төмен, орташа және жоғары әлеуетті аймақтарға жіктелген кеңістіктік үздіксіз жер асты суларының әлеуетті картасы жасалды.

Түйінді сөздер: машиналық оқыту, Random Forest, қашықтықтан зондтау, ауыл шаруашылығы, жер асты сулары.

MAPPING GROUNDWATER POTENTIAL USING SATELLITE DATA AND A MACHINE LEARNING ALGORITHM: A CASE STUDY OF THE ILI DISTRICT OF ALMATY REGION, SOUTH KAZAKHSTAN

Onlassyynov Zh.A.* – PhD, Head of the Laboratory of GIS technologies and earth remote sensing, Akhmedsafin Institute of Hydrogeology and Environmental Geoscience, Satbayev University, Almaty, Republic of Kazakhstan.

Absametov M.K. – Doctor of Geological and Mineralogical Sciences, Director of the Akhmedsafin Institute of Hydrogeology and Environmental Geoscience, Satbayev University, Almaty, Republic of Kazakhstan.

Murtazin Ye.Zh. – Candidate of Geological and Mineralogical Sciences, Deputy Director for Science, Akhmedsafin Institute of Hydrogeology and Environmental Geoscience, Satbayev University, Almaty, Republic of Kazakhstan.

Muratova M.M. – Leading engineer, Laboratory of GIS technologies and earth remote sensing, Akhmedsafin Institute of Hydrogeology and Environmental Geoscience, Satbayev University, Almaty, Republic of Kazakhstan.

This study utilizes an integrated approach based on the combined use of remote sensing data and machine learning methods to predict the spatial distribution of potential groundwater zones. Random Forest, a supervised learning method that demonstrates high robustness to input data noise, was selected as the primary classification algorithm.

The overall study design includes four main stages: generating input spatial variables; preparing a training set; training and tuning the Random Forest model; and validating and assessing the accuracy of the results. The input variables included spectral indices (NDVI, NDWI); morphometric parameters (Slope, DEM); and hydrological factor (Distance to Rivers). The training data included water intake facility locations in the Ili district of the Almaty region.

To model groundwater potential, the Random Forest algorithm was implemented in Python using the Scikit-learn library. Satellite and geomorphometric data were used as predictors and processed in ArcGIS software. All variables were converted to a common spatial resolution and coordinate system. To ensure data comparability, values were normalized, reducing the impact of differences in feature ranges on the model training process. The trained model was applied to the entire study area using raster overlay, resulting in a spatially continuous groundwater potential map classified into low, medium, and high potential zones.

Key words: machine learning, Random Forest, remote sensing, agriculture, groundwater.

Введение. Недавние исследования продемонстрировали эффективность интеграции мультиспектральных данных Sentinel-2 с алгоритмами машинного обучения, такими как Random Forest, для картирования потенциала грунтовых вод и гидрологического анализа. По этой теме можно отметить работу ученых из Египта и Саудовской Аравии. В своем исследовании вместо категориальных данных использовались растровые спутниковые данные и модель машинного обучения «Random Forest» для выявления зон потенциального залегания подземных вод в низовьях Вади-Яламлам, на западе Саудовской Аравии [1, с. 2772].

Индийские специалисты оценили будущие потенциальные зоны подземных вод на основе алгоритмов машинного обучения и сценариев изменения климата. Для разработки алгоритмов машинного обучения использовались четырнадцать параметров (кривизна, плотность дренажной сети, уклон, шероховатость, количество осадков, температура, относительная влажность, плотность линейных элементов, землепользование и растительный покров, общие типы почв, геология, геоморфология, топографический индекс положения (TPI), топографический индекс влажности (TWI)). Для идентификации потенциальных зон подземных вод были применены три алгоритма машинного обучения (искусственная нейронная сеть (ANN), логистическое дерево моделей (LMT) и логистическая регрессия (LR)) [2, с. 10328].

Цель работы исследований индонезийских ученых – изучить потенциал подземных вод в Западной Яве, Индонезия, с использованием методов машинного обучения с учителем, а именно Random Forest, машины опорных векторов (SVM) и искусственной нейронной сети (ANN). В исследовании использовались различные факторы, влияющие на состояние подземных вод, такие как топографический индекс влажности (TWI), нормализованный разностный индекс растительности (NDVI), литология, геоморфология, землепользование и растительный покров (LULC), тип почвы и система землепользования [3, с. 101382].

Китайские специалисты использовали в работах временные ряды с высоким пространственно-временным разрешением для мониторинга роста сельскохозяйственных культур и управления водными ресурсами, способствуя дальнейшему расширению применения спутникового дистанционного зондирования в точном земледелии [4, с. 113].

Немецкие исследователи путем интеграции временно и пространственно выровненной радиолокационной информации из данных Sentinel-1 с существующими многоспектральными данными Sentinel-2 создали новый многоисточниковый и многовременной набор данных. Оценка точности проводилась с использованием пространственно независимых выборок. [5, с. 21].

Африканские исследователи в своей статье изучают различные методы проверки таких заявлений на уровне отдельных участков с использованием нормализованного разностного индекса растительности (NDVI) и нормализованного разностного индекса воды (NDWI) на изображениях Sentinel-2A, дерева классификации и регрессии (CART) на изображениях Sentinel-1 SAR [6, с. 6095].

Иранские ученые для различения типов землепользования и растительного покрова (LULC) использовали две модели машинного обучения, а также спектральные диапазоны и индексы Sentinel-2 [7, с. 5580].

В качестве территории исследования выбран Илийский район Алматинской области, что обусловлено рядом природных, гидрологических и антропогенных факторов, определяющих его высокую науч-

ную значимость для изучения подземных вод с применением данных дистанционного зондирования и методов машинного обучения.

Во-первых, район характеризуется аридными и полуаридными природно-климатическими условиями. Около 80% территории представлено пустынными и пустынно-степными ландшафтами, включая песчаные массивы (Сартаукум, Караой), что обуславливает дефицит поверхностных водных ресурсов и повышенную зависимость экосистем и хозяйственной деятельности от подземных вод.

Во-вторых, климат района является резко континентальным, с жарким летом и ограниченным количеством осадков, что усиливает процессы испарения и формирует условия водного дефицита. В таких условиях подземные воды играют ключевую роль в поддержании растительности и сельского хозяйства, что делает район особенно подходящим для анализа по спутниковым индексам (NDVI, NDWI).

В-третьих, Илийский район обладает развитой гидрографической сетью, включающей реку Или, а также ряд малых рек, водохранилищ и озёр (включая Капчагайское водохранилище и озеро Сорбулак). Такое сочетание водных объектов создаёт выраженный контраст между увлажнёнными и засушливыми территориями, что является важным условием для обучения моделей машинного обучения и повышения точности прогнозирования.

Дополнительным фактором является интенсивная хозяйственная деятельность, включая орошаемое земледелие. Использование водных ресурсов для сельского хозяйства усиливает нагрузку на водоносные горизонты и способствует формированию пространственной неоднородности распределения подземных вод, что представляет интерес для анализа и моделирования.

Кроме того, район расположен вблизи крупного урбанизированного центра – города Алматы, что обуславливает рост антропогенного воздействия на водные ресурсы, включая водозабор и изменение естественного гидрологического режима.

Все перечисленные показатели делают Илийский район репрезентативной и научно обоснованной территорией для прогнозирования зон подземных вод с использованием интеграции данных дистанционного зондирования и методов машинного обучения. Дополнительную научную значимость району придаёт интенсивная хозяйственная деятельность, прежде всего орошаемое земледелие. Антропогенное воздействие приводит к перераспределению водных ресурсов, изменению режима инфильтрации и формированию локальных зон разгрузки и аккумуляции подземных вод. Это создаёт сложную пространственную структуру факторов, что является благоприятным условием для применения алгоритмов машинного обучения, способных учитывать нелинейные взаимосвязи между переменными.

Цель. Применение интегрированного подхода, основанного на совместном использовании данных дистанционного зондирования и методов машинного обучения для прогнозирования пространственного распределения потенциальных зон подземных вод Илийского района Алматинской области.

Задачи: подготовка геопространственных наборов данных; извлечение растровых значений в зоне исследования; обучение и валидация модели Random Forest, пространственное прогнозирование и создание карты потенциала подземных вод; анализ значимости переменных.

Материалы и методы. Для вычисления факторов, влияющих на подземные воды, использованы изображения спутниковой миссии Sentinel-2, реализуемой European Space Agency в рамках программы Copernicus. Данные Sentinel-2 обеспечивают получение многоспектральных изображений с высоким пространственным и временным разрешением, что делает их оптимальными для задач гидрологического и экологического мониторинга. В работе были использованы архивные снимки изображения уровня обработки Level-2A (Surface Reflectance), прошедшие атмосферную коррекцию, общим объемом 9,07 Гб, а также цифровая модель рельефа (ЦМР) с разрешением 30 метров. Снимки находятся в открытом и свободном доступе для любого зарегистрированного пользователя (таблица 1).

Таблица 1 – Список сцен снимков Sentinel-2

№	Identifier	Clode, %
1	S2A_MSIL1C_20250506T055251_N0511_R048_T43TEJ_20250506T064443.SAFE	3
2	S2A_MSIL1C_20250506T055251_N0511_R048_T43TEK_20250506T064443.SAFE	1
3	S2A_MSIL1C_20250506T055251_N0511_R048_T43TFJ_20250506T064443.SAFE	0
4	S2A_MSIL1C_20250506T055251_N0511_R048_T43TFK_20250506T064443.SAFE	12
5	S2C_MSIL1C_20250723T054701_N0511_R048_T43TEJ_20250723T073948.SAFE	7
6	S2C_MSIL1C_20250723T054701_N0511_R048_T43TEK_20250723T073948.SAFE	18
7	S2A_MSIL1C_20250725T055301_N0511_R048_T43TFJ_20250725T064855.SAFE	23
8	S2A_MSIL1C_20250725T055301_N0511_R048_T43TFK_20250725T064855.SAFE	3
9	S2B_MSIL1C_20250906T054639_N0511_R048_T43TEK_20250906T072947.SAFE	5
10	S2C_MSIL1C_20250921T054651_N0511_R048_T43TEJ_20250921T074452.SAFE	8
11	S2C_MSIL1C_20250921T054651_N0511_R048_T43TFJ_20250921T074452.SAFE	0
12	S2C_MSIL1C_20250921T054651_N0511_R048_T43TFK_20250921T074452.SAFE	0

Предварительно, для подготовки данных к работе, все снимки были приведены в единую координатную систему: Datum WGS_1984, UTM_zone_43N. Для создания полного, бесшовного и единого мозаичного

покрытия исследуемой территории, были использованы по 4 тайла снимков весеннего, летнего, осеннего сезонов, проведено цветовое уравнивание для минимизации различий между снимками, а также автоматическое определение «линии сшивки». Эти моменты создали однородные радиометрические условия на всей исследуемой территории. Временной охват данных сформирован с учётом сезонной динамики и включает сцены, соответствующие различным фазам вегетационного периода, что позволяет учитывать изменения гидротермических условий и их влияние на индикаторы, связанные с подземными водами.

Для оценки состояния растительного покрова использован нормализованный разностный вегетационный индекс – NDVI (таблица 2). Данный индекс является одним из наиболее широко применяемых показателей в дистанционном зондировании и используется для анализа биомассы, продуктивности и водообеспеченности растительности (рисунок 1).

NDVI рассчитывается по следующей формуле:

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

где: *NIR* – отражательная способность в ближнем инфракрасном диапазоне, *RED* – отражательная способность в красном диапазоне

Таблица 2 – Использованные данные Sentinel-2

Sentinel-2 Bands	CentralWavelength (µm)	Resolution (m)	Shooting mode
Band 4 – RED	0,665	10	VNIR
Band 8 – NIR	0,842	10	VNIR

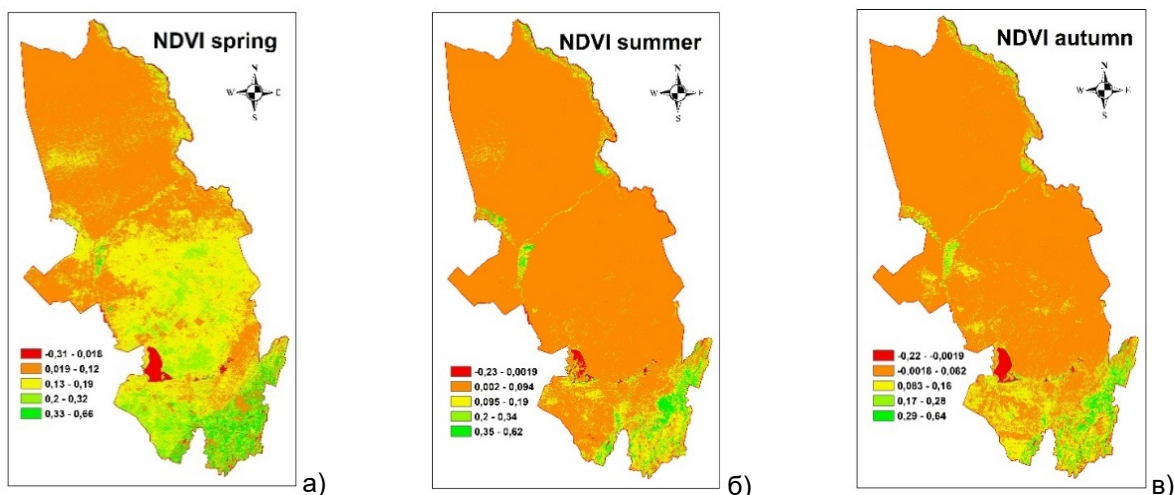


Рисунок 1 – Сезонные показатели NDVI территории Илийского района:

а) весенний показатель NDVI; б) летний показатель NDVI; в) осенний показатель NDVI

Значения NDVI варьируются в диапазоне от -1 до +1 (от красного к зеленому цвету). Высокие значения индекса (0.5–0.9) соответствуют плотной и здоровой растительности, тогда как низкие значения (близкие к 0 или отрицательные) характерны для оголённых почв, урбанизированных территорий и водных поверхностей. В контексте настоящего исследования NDVI рассматривается как косвенный индикатор наличия подземных вод, поскольку в условиях аридного климата устойчиво высокая вегетационная активность может свидетельствовать о дополнительном водоснабжении за счёт подпитки из водоносных горизонтов. В весенний период значения NDVI варьируют от -0.305 до 0.656. Весной наблюдается наиболее широкий диапазон значений, что отражает высокую пространственную контрастность территории. Положительные значения NDVI (0.3–0.65) соответствуют участкам с активной вегетацией, включая сельскохозяйственные земли и пойменные территории. Отрицательные и близкие к нулю значения (-0.3–0.1) характерны для оголённых почв, песчаных массивов и водных поверхностей. В летний период значения NDVI варьируют от -0.226 до 0.616. Летом наблюдается некоторое снижение максимальных значений NDVI по сравнению с весной, что может быть связано с водным стрессом растительности в условиях высоких температур и дефицита осадков. При этом отрицательные значения остаются стабильными, отражая устойчивые непокрытые поверхности. Значения NDVI варьируют от -0.220 до 0.636. Осенью наблюдается незначительное восстановление максимальных значений NDVI по сравнению с летним периодом. Это может быть связано с завершением сельскохозяйственного цикла (уборка, орошение) и вторичной вегетацией на отдельных участках. Однако общая структура распределения остаётся сходной с летним сезоном. В целом, диапазон NDVI по сезонам остаётся стабильным: это указывает на устойчивую пространственную структуру землепользования, наличие постоянных зон растительности (вероятно, зависящих от водообеспечения), стабильное присутствие аридных поверхностей.

Для оценки пространственного распределения влаги использован нормализованный разностный водный индекс – NDWI (таблица 3). Индекс позволяет выявлять участки с повышенным содержанием влаги, включая поверхностные водные объекты и зоны увлажнённых почв (рисунок 2). NDWI рассчитывается по формуле:

$$NDWI = \frac{NIR - SWIR}{NIR + SWIR} \quad (2)$$

где: *NIR* – ближний инфракрасный диапазон,
SWIR – коротковолновый инфракрасный диапазон.

Таблица 3 – Используемые данные Sentinel-2

Sentinel-2 Bands	CentralWavelength (µm)	Resolution (m)	Shooting mode
Band 8 – NIR	0,842	10	VNIR
Band 11 – SWIR	1.610	20 приведённый к 10 м	SWIR

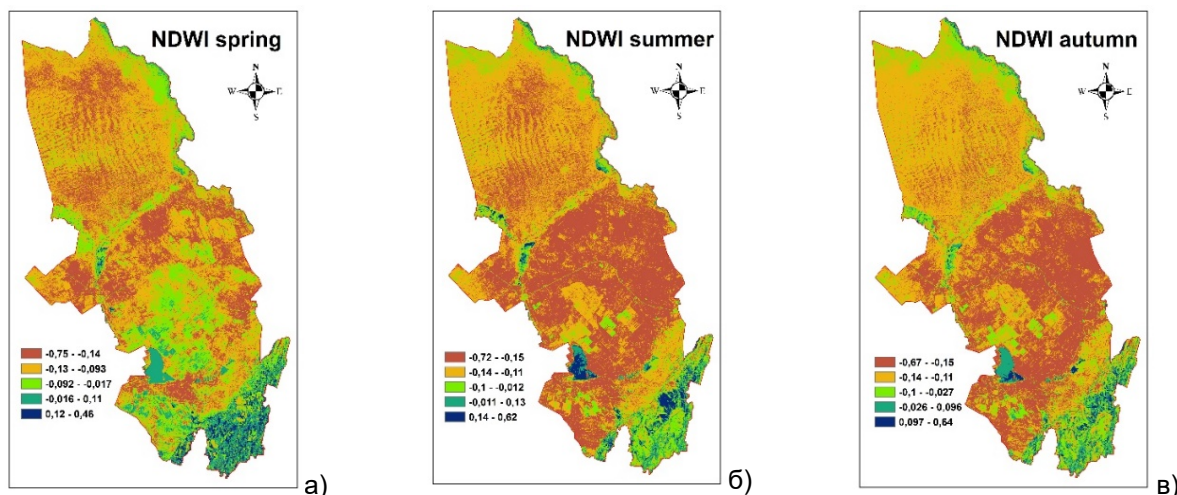


Рисунок 2 – Сезонные показатели NDWI территории Илийского района:

а) весенний показатель NDWI; б) летний показатель NDWI; в) осенний показатель NDWI

Значения NDWI также варьируются от -1 до +1. Более высокие значения соответствуют наличию воды или повышенной влажности, тогда как отрицательные значения характерны для сухих поверхностей. В рамках данного исследования NDWI используется для: выявления зон накопления влаги, идентификации участков потенциальной инфильтрации, косвенной оценки процессов подпитки подземных вод. Анализ нормализованного водного индекса, рассчитанного на основе данных Sentinel-2, позволяет оценить пространственно-временную динамику поверхностной и почвенной влажности на территории исследования в весенний, летний и осенний периоды. Значения NDWI весной варьируют от -0.749 до 0.463. В этот сезон наблюдается наиболее широкий диапазон значений индекса, что отражает высокую пространственную неоднородность условий увлажнения. Положительные значения NDWI (0.2–0.46) соответствуют участкам с повышенной влажностью, включая пойменные зоны, орошаемые сельскохозяйственные территории и участки с близким залеганием грунтовых вод. Отрицательные значения (до -0.75) характерны для сухих почв, песчаных поверхностей и слабо увлажнённых аридных территорий. Летом значения NDWI варьируют от -0.720 до 0.617. Летом наблюдается сохранение высоких максимальных значений NDWI (до 0.61), что указывает на наличие устойчивых увлажнённых участков даже в условиях высокой температуры и испаряемости. Это может быть связано с влиянием ирригации или подпитки подземными водами. В осенний период значения NDWI варьируют от -0.665 до 0.637. Осенью наблюдается небольшое увеличение максимальных значений NDWI по сравнению с летним периодом. Это может быть связано с сезонным снижением испаряемости, завершением вегетационного периода и возможной активизацией процессов накопления влаги в почве. Отрицательные значения остаются устойчивыми, что подтверждает сохранение аридного фона на значительной части территории. Сравнение сезонных значений показывает стабильное присутствие как отрицательных, так и положительных значений индекса. Все это указывает на выраженную пространственную неоднородность водного режима, наличие устойчивых влажных зон среди аридного фона, влияние как природных (грунтовые воды), так и антропогенных факторов (орошение). Стабильно высокие значения NDWI в отдельные сезоны (до 0.60–0.63) могут свидетельствовать о наличии локальных зон повышенной влажности, потенциально связанных с неглубокими грунтовыми водами или ирригационным питанием, что особенно характерно для аридных территорий Илийского района.

Цифровая модель рельефа позволяет учитывать орографические особенности территории, влияющие на поверхностный сток, инфильтрацию и аккумуляцию влаги. В условиях аридного климата рельеф играет важную роль в перераспределении водных потоков и формировании локальных зон

подпитки подземных вод. Перед использованием DEM была приведена к единой системе координат и пространственному разрешению, согласованному с другими используемыми наборами данных.

Для учёта влияния гидрографической сети на формирование подземных вод был рассчитан показатель расстояния до ближайших водных объектов, или Евклидово расстояние до дренажной сети (Distance to Rivers). В качестве исходных данных использованы векторные слои рек и водоёмов, включая реку Или и связанные с ней гидрологические элементы. Расчёт расстояния выполнен с применением инструмента Euclidean Distance в среде ArcGIS, в результате чего получен непрерывный растровый слой, отражающий удалённость каждой точки территории от ближайшего водного объекта. Данный параметр является важным гидрогеологическим индикатором, поскольку близость к рекам и водоёмам часто коррелирует с:

- 1) повышенным уровнем грунтовых вод;
- 2) зонами разгрузки подземных вод;
- 3) участками активной инфильтрации.

Меньшие значения расстояния, как правило, ассоциируются с более высокой вероятностью наличия подземных вод, тогда как удалённые участки характеризуются более ограниченным водообеспечением.

Анализ морфометрического параметра уклона (Slope), полученного на основе цифровой модели рельефа SRTM и рассчитанного в среде ArcGIS, показал, что значения уклона варьируют в диапазоне от 2.44% до 62.2%. Полученные значения выражены в процентах (Percent Rise) и отражают степень крутизны поверхности исследуемой территории. Низкие значения уклона (2–10%), на карте темно-зеленого до желтого цвета, данные участки соответствуют: аллювиальным равнинам, пойменным территориям реки Или. Эти данные показывают низкую скорость поверхностного стока, высокую вероятность инфильтрации, благоприятные условия для формирования подземных вод. Средние значения уклона (10–18%), на результирующей карте оранжевого цвета, характерны для переходных зон. Они указывают на умеренный поверхностный сток, частичную инфильтрацию, смешанные условия водообеспечения. Высокие значения уклона (18–62%), красный диапазон, приурочены к возвышенным участкам и склонам. Значит эти зоны имеют интенсивный поверхностный сток, минимальную инфильтрацию, низкую вероятность накопления подземных вод (рисунок 3).

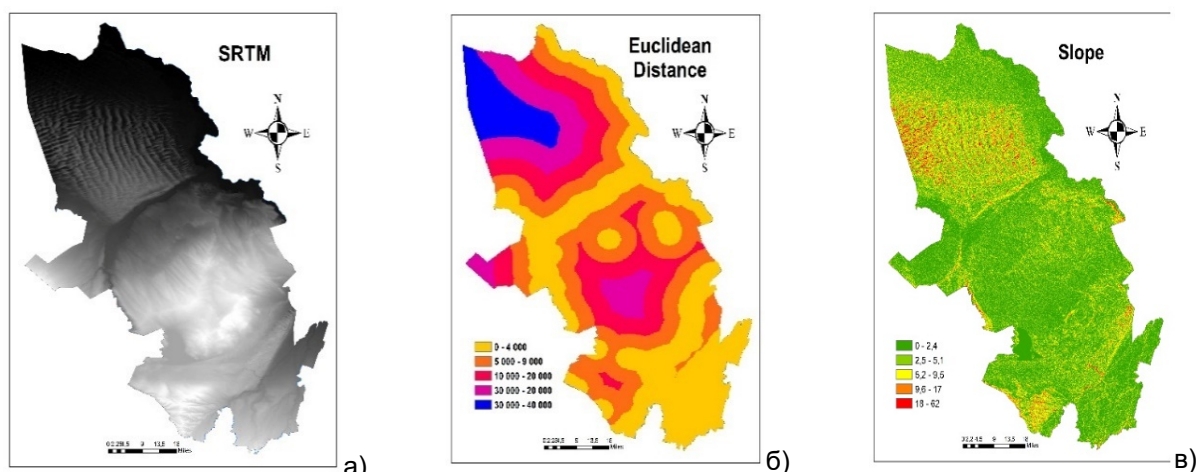


Рисунок 3 – Геопространственные показатели Илийского района:

а) SRTM; б) Евклидово расстояние; в) карта уклона

Использование DEM, уклона и расстояния до водных объектов в совокупности со спектральными индексами (NDVI, NDWI) позволяет сформировать многопараметрическое описание исследуемой территории, учитывающее как морфометрические, так и гидрологические особенности. Такая интеграция факторов является особенно эффективной при применении методов машинного обучения, поскольку позволяет учитывать сложные и нелинейные взаимосвязи между рельефом, поверхностными процессами и условиями формирования подземных вод.

Алгоритм Random Forest представляет собой ансамбль решающих деревьев, обучаемых на случайных подвыборках исходных данных и признаков. Итоговое решение формируется путём голосования (majority voting) всех деревьев ансамбля.

Формально модель может быть представлена как:

$$\hat{y} = \text{mode}(T_1(x), T_2(x), \dots, T_n(x)) \quad (3)$$

где: $T_i(x)$ – предсказание i -го дерева, n – количество деревьев в ансамбле.

Преимуществами данного метода являются: устойчивость к переобучению; способность работать с нелинейными зависимостями; высокая точность при ограниченном объёме обучающих данных; возможность оценки важности признаков.

Реализация модели выполнена в среде Python с использованием библиотеки Scikit-learn.

Краткий код для Python: извлечь растровые значения в местах расположения скважин; создать обучающий набор данных; классифицировать скважины на основе расхода (квантили); обучить модель Random Forest; применить модель к набору растровых данных; сгенерировать карту потенциала грунтовых вод.

Загружаем подготовленные данные:

```
project/
├── ndvi_spring.tif, ndvi_summer.tif, ndvi_autumn.tif
├── ndwi_spring.tif, ndwi_summer.tif, ndwi_autumn.tif
├── slope.tif
├── dem.tif
├── distance.tif
├── wells.shp
├── wells.dbf
├── wells.shx
└── wells.prj
```

После загрузки растровых данных, подготовили обучающую выборку из wells (скважины), в качестве эталонного набора данных использовался векторный набор данных о скважинах подземных вод. Каждая скважина содержала информацию о дебите (сбросе), которая служила основой для обучения модели.

Следующим этапом извлекли значения факторов в точках скважин, провели обучение Random Forest, задали построение карты потенциала подземных вод исследуемой территории. Классы потенциала грунтовых вод были получены из дебита скважин (Debit) с использованием квантильной классификации. Валидация: набор данных был разделен на 70% обучающую и 30% тестовую подгруппы. Применение модели: обученная модель была применена к растровым слоям с использованием подхода попиксельного прогнозирования.

Среда реализации: вся обработка данных, анализ и моделирование выполнялись с использованием среды программирования Python. Обработка геопространственных данных и растровых изображений проводилась с помощью библиотек rasterio и georandas, что обеспечило эффективное чтение, манипулирование и извлечение пространственных данных. Визуализация результатов и промежуточных выходных данных выполнялась с помощью Matplotlib. Модель была реализована на Python с использованием библиотеки scikit-learn со следующими параметрами: количество деревьев: 300, случайное состояние: 42, вес классов: сбалансированный.

Набор данных был случайным образом разделен на обучающую (70%) и тестовую (30%) подгруппы с использованием стратифицированной выборки для сохранения пропорций классов. В итоговых данных классы потенциала грунтовых вод были определены на основе данных о дебите скважин с использованием квантильного подхода к классификации. Набор данных был разделен на три категории на основе 33-го и 66-го процентилей: низкий, средний и высокий потенциалы. Такой подход обеспечивает сбалансированное распределение образцов по классам и позволяет избежать субъективного выбора пороговых значений. Для оценки вклада каждого фактора, влияющего на ситуацию, из модели Random Forest были извлечены оценки важности признаков. Эти оценки позволяют получить представление об относительном влиянии топографических, гидрологических и растительных переменных на наличие грунтовых вод.

После обучения модель Random Forest была применена ко всему набору растровых слоев с использованием попиксельного подхода к прогнозированию. Все факторы, влияющие на потенциал, были объединены в многоканальный растр и преобразованы в двумерную матрицу признаков. Обученная модель использовалась для прогнозирования потенциала подземных вод для каждого пикселя, в результате чего была получена пространственно непрерывная карта потенциала подземных вод, классифицированная по трем категориям: низкий, средний и высокий. Итоговый результат был экспортирован в виде растра GeoTIFF для дальнейшей визуализации и анализа.

Результаты. Составленная карта потенциала подземных вод выявила неоднородное пространственное распределение по всей исследуемой территории. Зоны с высоким потенциалом подземных вод были в основном сосредоточены в низинах, речных долинах и регионах с благоприятной проницаемостью почвы и влажностью. Эти районы, вероятно, связаны с усиленными процессами пополнения и накопления грунтовых вод. Процент потенциала площади подземных вод на территории Илийского района распределена согласно полученным данным согласно алгоритму: low: 20% medium: 40% high: 40%.

Зоны со средним потенциалом были распределены в переходных зонах, часто окружающих регионы с высоким потенциалом и отражающих умеренные гидрогеологические условия. Зоны с низким потенциалом преимущественно располагались на возвышенностях и в районах с ограниченным растительным покровом и низкой доступностью влаги.

Для оценки достоверности результатов моделирования была проведена сравнительная оценка между сгенерированной картой и гидрогеологической картой региона (рисунок 4). Визуальный анализ

показал высокую степень пространственного совпадения между предсказанными зонами распространения подземных вод и участками, выделенными на гидрогеологической карте. Наибольшее соответствие наблюдается в аллювиальных отложениях долины реки Или, где обе карты фиксируют повышенную вероятность наличия водоносных горизонтов. Так же наблюдаются небольшие различия в центральной зоне региона, что возможно связано с изменениями гидрогеологических условий, во время составления карт. Полученные результаты подтверждают высокую прогностическую способность алгоритма Random Forest при решении задач картирования подземных вод и демонстрируют его применимость для уточнения гидрогеологических условий в районах с ограниченными полевыми данными.

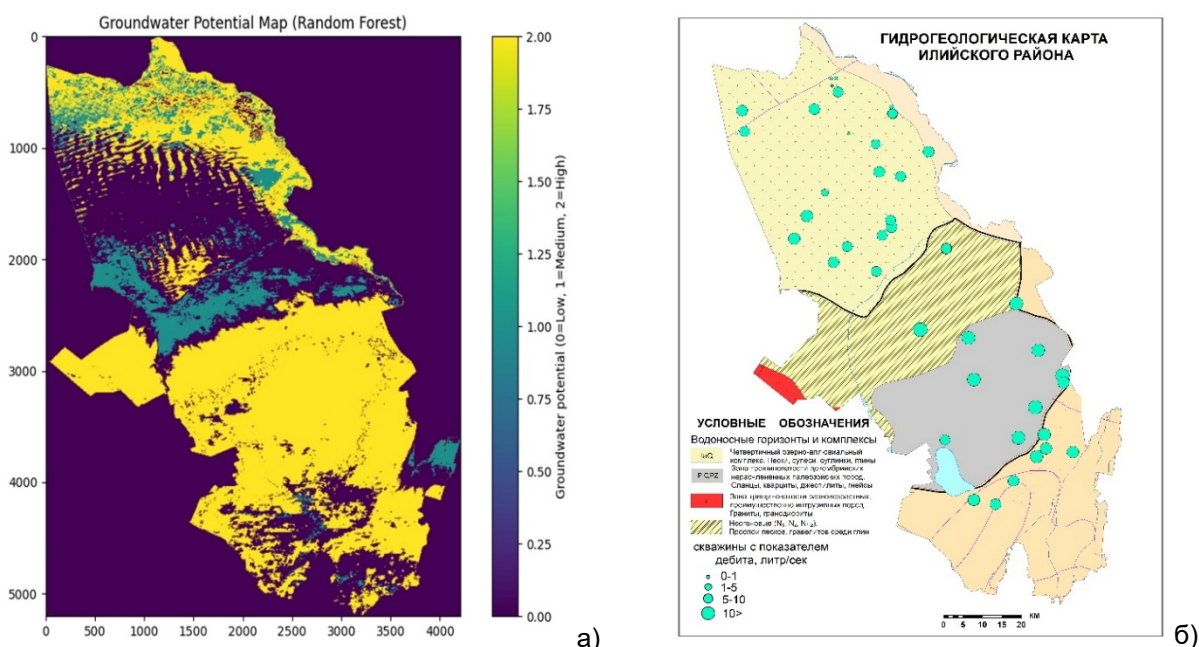


Рисунок 4 – Полученные результаты работы: а) Сгенерированная карта потенциала подземных вод;
б) Гидрогеологическая карта территории Илийского района

Анализ важности признаков, полученный с помощью модели Random Forest, показал, что определенные переменные оказывают более сильное влияние на картирование потенциала подземных вод. Среди них сезонные показатели NDWI, NDVI, показали самые высокие показатели важности. Сезонные индексы, такие как NDVI и NDWI, внесли значительный вклад в эффективность модели, подчеркивая важность динамики растительности и условий поверхностной влажности в процессах пополнения подземных вод. В частности, слои NDWI оказались сильными индикаторами доступности влаги, которая напрямую связана с потенциалом инфильтрации.

Топографические факторы, представленные ЦМР, также играли решающую роль, контролируя процессы стока, инфильтрации и накопления. Аналогично, тип почвы влиял на наличие подземных вод, воздействуя на проницаемость и водоудерживающую способность.

Эти результаты демонстрируют преимущество интеграции многовременных спутниковых индексов с данными о рельефе и почве для улучшения моделирования подземных вод.

Наблюдаемые на карте пространственные закономерности соответствуют известным гидрогеологическим принципам, где топография, характеристики почвы и близость к дренажным сетям играют решающую роль в наличии подземных вод.

Модель Random Forest продемонстрировала высокую прогностическую способность в классификации зон потенциального залегания грунтовых вод. Общая точность классификации на тестовом наборе данных достигла [вставить значение, например, 0,82–0,90], что указывает на хорошее соответствие между прогнозируемыми и наблюдаемыми классами.

Включение сезонных индексов NDVI и NDWI в данное исследование обеспечивает дополнительное преимущество, поскольку позволяет учитывать временную изменчивость, которая часто игнорируется в традиционных оценках подземных вод. Такой подход повышает способность модели отражать реальные условия окружающей среды.

Полученная карта потенциала подземных вод предоставляет ценную информацию для управления водными ресурсами, особенно в засушливых и полузасушливых регионах. Выделенные в этом исследовании зоны с высоким потенциалом могут служить приоритетными областями для разведки подземных вод.

Более того, представленная здесь методология предлагает воспроизводимую и масштабируемую основу, которую можно применять в других регионах с аналогичными условиями окружающей среды. Интеграция данных дистанционного зондирования и методов машинного обучения позволяет прово-

дить эффективную и экономически выгодную оценку подземных вод и устойчивого развития сельского хозяйства.

Эти результаты подтверждают пригодность подхода Random Forest для моделирования сложных нелинейных взаимосвязей между факторами окружающей среды и наличием грунтовых вод.

Закключение. В данном исследовании продемонстрирована эффективность интеграции многоисточниковых геопространственных данных с моделью случайного леса для картирования потенциала подземных вод в Илийском районе южного Казахстана. Путем объединения топографических, гидрологических, почвенных и многовременных спутниковых индексов (NDVI и NDWI) была разработана надежная и основанная на данных система для выявления пространственных вариаций потенциала подземных вод.

Классификация потенциала подземных вод на основе дебита скважин (Debit) с использованием квантильного подхода позволила сформировать сбалансированные и статистически достоверные классы (низкий, средний и высокий). Модель продемонстрировала высокую прогностическую эффективность, подтвердив свою способность улавливать сложные нелинейные взаимосвязи между переменными окружающей среды и наличием подземных вод.

Полученная карта потенциала подземных вод выявила неоднородную пространственную структуру, при этом зоны высокого потенциала в основном связаны с низменными районами, благоприятными почвенными условиями и близостью к дренажным сетям. Эти выводы согласуются с гидрогеологическими принципами и подчеркивают решающую роль поверхностной влажности и характеристик рельефа в процессах пополнения подземных вод.

Выделенные моделью зоны с высоким потенциалом могут быть обозначены как приоритетные районы для стратегического развития водоснабжения, особенно в регионах, испытывающих растущий спрос на воду в связи с расширением сельского хозяйства и ростом населения. И наоборот, в районах с низким потенциалом можно применять более консервативные методы добычи, чтобы предотвратить чрезмерную эксплуатацию и истощение подземных вод.

Результаты также могут способствовать планированию землепользования, предоставляя информацию для регулирования зонирования и направляя сельскохозяйственную практику. Например, орошаемые виды деятельности могут быть направлены в районы с более высокой доступностью подземных вод, в то время как водосберегающие методы могут продвигаться в зонах с низким потенциалом. Такой пространственно-ориентированный подход способствует более эффективному распределению водных ресурсов и повышает долгосрочную устойчивость.

Информация о финансировании. Данное исследование финансировалось Комитетом науки Министерства науки и высшего образования Республики Казахстан (BR 24992885 «Научно-практическое обоснование устойчивого развития отечественного животноводства на основе обводнения пастбищных территорий подземными водами»).

Конфликт интересов: Авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов.

ЛИТЕРАТУРА:

1. Madani, A. and Niyazi, B. (2023) 'Groundwater potential mapping using remote sensing and random forest machine learning model: a case study from lower part of Wadi Yalamlam, Western Saudi Arabia [Text] / Sustainability, 15(3), p. 2772. <https://doi.org/10.3390/su15032772>.
2. Sarkar, S.K., Rudra, R.R., Talukdar, S., Das, P.C., Nur, M.S., Alam, E., Islam, M.K. and Islam, A.R.M.T. (2024) Future groundwater potential mapping using machine learning algorithms and climate change scenarios in Bangladesh [Text] / Scientific Reports, 14, p. 10328. <https://doi.org/10.1038/s41598-024-60560-2>.
3. Nugroho, J.T., Lestari, A.I., Gustiandi, B., Sofan, P., Suwarsono, Prasasti, I., Rahmi, K.I.N., Noviar, H., Sari, N.M., Manalu, R.J., Arifin, S. and Taufiq, A. (2024) Groundwater potential mapping using machine learning approach in West Java, Indonesia [Text] / Groundwater for Sustainable Development, 27, p. 101382. <https://doi.org/10.1016/j.gsd.2024.101382>.
4. Du, U., Xiang, Y., Chen, J., Lu, X., Zhang, F., Zhang, Z., Yang, B., Tang, Z., Wang, X. and Qian, L. (2024) Daily soil water content monitoring of cropland in irrigation area using Sentinel-2/3 spatio-temporal fusion and machine learning [Text] / International Journal of Applied Earth Observation and Geoinformation, 132, p. 104081. <https://doi.org/10.1016/j.jag.2024.104081>.
5. Orynbaikyzy, A., Gessner, U. and Conrad, C. (2022) Spatial transferability of random forest models for crop type classification using Sentinel-1 and Sentinel-2 [Text] / Remote Sensing, 14(6), 1493. <https://doi.org/10.3390/rs14061493>.
6. Thapa, A., Horanont, T. and Neupane, B. (2022) Parcel-level flood and drought detection for insurance using Sentinel-2A, Sentinel-1 SAR GRD and mobile images [Text] / Remote Sensing, 14, p. 6095. <https://doi.org/10.3390/rs14236095>.
7. Atefe Arfa, Masoud Minaei (2024) Utilizing multitemporal indices and spectral bands of Sentinel-2 to enhance land use and land cover classification with random forest and support vector machine [Text] / Advances in Space Research, 74(11), pp. 5580–5590. <https://doi.org/10.1016/j.asr.2024.08.062>.

REFERENCES:

1. Madani A., Niyazi B. Groundwater potential mapping using remote sensing and random forest machine learning model: a case study from lower part of Wadi Yalamlam, Western Saudi Arabia. *Sustainability*, 2023, 15(3), art. 2772. <https://doi.org/10.3390/su15032772>.
2. Sarkar S.K., Rudra R.R., Talukdar S., et al. Future groundwater potential mapping using machine learning algorithms and climate change scenarios in Bangladesh. *Scientific Reports*, 2024, 14, art. 10328. <https://doi.org/10.1038/s41598-024-60560-2>.
3. Nugroho J.T., Lestari A.I., Gustiandi B., et al. Groundwater potential mapping using machine learning approach in West Java, Indonesia. *Groundwater for Sustainable Development*, 2024, 27, art. 101382. <https://doi.org/10.1016/j.gsd.2024.101382>.
4. Du U., Xiang Y., Chen J., et al. Daily soil water content monitoring of cropland in irrigation area using Sentinel-2/3 spatio-temporal fusion and machine learning. *International Journal of Applied Earth Observation and Geoinformation*, 2024, 132, art. 104081. <https://doi.org/10.1016/j.jag.2024.104081>.
5. Orynbaikyzy A., Gessner U., Conrad, C. Spatial transferability of random forest models for crop type classification using Sentinel-1 and Sentinel-2. *Remote Sensing*, 2022, 14(6), art. 1493. <https://doi.org/10.3390/rs14061493>.
6. Thapa A., Horanont T., Neupane, B. Parcel-level flood and drought detection for insurance using Sentinel-2A, Sentinel-1 SAR GRD and mobile images, *Remote Sensing*, 2022, 14, art. 6095. <https://doi.org/10.3390/rs14236095>.
7. Atefe Arfa, Masoud Minaei. Utilizing multitemporal indices and spectral bands of Sentinel-2 to enhance land use and land cover classification with random forest and support vector machine. *Advances in Space Research*, 2024, 74(11), pp. 5580–5590. <https://doi.org/10.1016/j.asr.2024.08.062>.

Дата поступления: 24 апреля 2026 г. Принято: 24 июня 2026 г.

Опубликовано: 30 сентября 2026 г.

Сведения об авторах:

Оңласынов Жұлдызбек Әліханұлы* – доктор философии (PhD), заведующий лабораторией ГИС-технологий и ДЗЗ, «Институт гидрогеологии и геоэкологии им У.М. Ахмедсафина, Satbayev University», Республика Казахстан, 050010, г. Алматы, ул. Валиханова 94, тел.: 87716217511, e-mail: zhuldyzbek.onlasynov@mail.ru.

Абсаметов Малис Кудысович – доктор геолого-минералогических наук, профессор, директор, «Институт гидрогеологии и геоэкологии им У.М. Ахмедсафина, Satbayev University», Республика Казахстан, 050010, г. Алматы, ул. Валиханова 94, тел.: 8(727)2911862, e-mail: igg.info@mail.ru.

Муртазин Ермек Жамшитович – кандидат геолого-минералогических наук, заместитель директора по науке, «Институт гидрогеологии и геоэкологии им У.М. Ахмедсафина, Satbayev University», Республика Казахстан, 050010, г. Алматы, ул. Валиханова 94, тел.: 8(727)2915031, e-mail: ye_murtazin@list.ru.

Муратова Мира Муратовна – ведущий инженер лаборатории ГИС-технологий и ДЗЗ, «Институт гидрогеологии и геоэкологии им У.М. Ахмедсафина, Satbayev University», 050010, Республика Казахстан, г. Алматы, ул. Валиханова 94, тел.: 8(727)2914686, e-mail: doc-mira@mail.ru.

Оңласынов Жұлдызбек Әліханұлы* – гидрогеология және инженерлік геология ғылымдарының докторы (PhD), «У.М. Ахмедсафин атындағы Гидрогеология және геоэкология институтының ГАЖ технологиялары және қашықтықтан зондтау зертханасының меңгерушісі, Сәтбаев университеті», Қазақстан Республикасы, 050010, Алматы қ., Уәлиханов көш. 94, тел.: 87716217511, e-mail: zhuldyzbek.onlasynov@mail.ru.

Абсаметов Мәліс Құдысұлы – геология-минералогия ғылымдарының докторы, профессор, «У.М. Ахмедсафин атындағы Гидрогеология және геоэкология институтының директоры, Сәтбаев университеті», Қазақстан Республикасы, 050010, Алматы қ., Уәлиханов көш., 94, тел.: 8(727)2911862, e-mail: igg.info@mail.ru.

Муртазин Ермек Жәмшитұлы – геология-минералогия ғылымдарының кандидаты, директордың ғылым жөніндегі орынбасары, «У.М. Ахмедсафин атындағы Гидрогеология және геоэкология институты, Сәтбаев университеті», 050010, Қазақстан Республикасы, Алматы қ., Уәлиханов көш., 94, тел.: 8(727)2915031, e-mail: ye_murtazin@list.ru.

Мұратова Мира Мұратқызы – ГАЖ технологиялары және қашықтықтан зондтау зертханасының жетекші инженері, «У.М. Ахмедсафин атындағы Гидрогеология және геоэкология институты, Сәтбаев университеті», 050010, Қазақстан Республикасы, Алматы қ., Уәлиханов көш. 94, тел.: 8(727)2914686, e-mail: doc-mira@mail.ru.

Onlassynov Zhuldyzbek Alikhanuly* – PhD, Head of the Laboratory of GIS technologies and earth remote sensing, Akhmedsafa Institute of Hydrogeology and Environmental Geoscience, Satbayev University,

Republic of Kazakhstan, 050010, Almaty, 94 Valikhanov Str., tel.: 87716217511, e-mail: zhuldyzbek.onlasynov@mail.ru.

Absametov Malis Kudyssovich – Doctor of Geological and Mineralogical Sciences, Professor, Director of the Akhmedsafin Institute of Hydrogeology and Environmental Geoscience, Satbayev University, Republic of Kazakhstan, 050010, Almaty, 94 Valikhanov Str., tel.: 8(727)2911862, e-mail: igg.info@mail.ru.

Murtazin Yermek Zhamshitovich – Candidate of Geological and Mineralogical Sciences, Deputy Director for Science, Akhmedsafin Institute of Hydrogeology and Environmental Geoscience, Satbayev University, Republic of Kazakhstan, 050010, Almaty, 94. Valikhanov Str., tel.: 8(727)2915031, e-mail: ye_murtazin@list.ru.

Muratova Mira Muratovna – Leading engineer, Laboratory of GIS technologies and earth remote sensing, Akhmedsafin Institute of Hydrogeology and Environmental Geoscience, Satbayev University, 050010, Republic of Kazakhstan, Almaty, 94 Valikhanov Str., tel.: 8(727)2914686, e-mail: doc-mira@mail.ru.

МРНТИ 68.85.87

УДК 631.372

<https://doi.org/10.52269/SEPT2631204>

ОПТИМИЗАЦИЯ УГЛА ЛОПАТОК ТУРБОКОМПРЕССОРА ДЛЯ ПОВЫШЕНИЯ ЭФФЕКТИВНОСТИ ДИЗЕЛЬНЫХ ДВИГАТЕЛЕЙ СЕЛЬСКОХОЗЯЙСТВЕННОЙ ТЕХНИКИ

Рустембаев А.Б. – доктор философии (PhD), заместитель директора института инжиниринга и пищевых технологий по научно-исследовательской работе и интернационализации, НАО «Казахский агротехнический исследовательский университет имени С. Сейфуллина», г. Астана, Республика Казахстан.

Тунников А.А. – магистрант кафедры транспортной техники и технологий, НАО «Казахский агротехнический исследовательский университет имени С. Сейфуллина», г. Астана, Республика Казахстан.

Кравченко Р.И. – доктор философии (PhD), заведующий кафедрой аграрной техники и транспорта, НАО «Костанайский региональный университет имени Ахмет Байтұрсынұлы», г. Костанай, Республика Казахстан.

Золотухин Е.А.* – доктор философии (PhD), ассоциированный профессор кафедры аграрной техники и транспорта, НАО «Костанайский региональный университет имени Ахмет Байтұрсынұлы», г. Костанай, Республика Казахстан.

Данное исследование направлено на повышение эксплуатационной эффективности дизельного двигателя ММЗ Д-245.9 за счёт совершенствования системы турбонаддува. Объектом исследования является центробежный компрессор ТКР 6.1, конструкция которого модернизирована посредством интеграции регулируемого входного направляющего аппарата, разработанного на основе патента RU2293220C2. В работе применены методы математического моделирования, термодинамического анализа и CFD-моделирования для оценки влияния предварительной закрутки воздушного потока на структуру течения в межлопаточных каналах рабочего колеса и параметры энергообмена в проточной части. Установлено, что штатная геометрия компрессора при номинальном режиме характеризуется критическим углом атаки +12,85°, вызывающим срыв потока, рост гидравлических потерь и снижение адиабатического коэффициента полезного действия. В результате параметрической оптимизации определён рациональный угол установки лопаток входного направляющего аппарата (45°), обеспечивающий безударный вход потока, стабилизацию структуры течения и повышение адиабатического КПД на 16,1%. Термодинамические расчёты показали снижение температуры наддувочного воздуха на 16,7 К и увеличение его плотности на 0,65%. Комплексное аэродинамическое совершенствование узла обеспечивает прирост эффективной мощности двигателя на 5,4% при одновременном снижении удельного расхода топлива на 2,4%, что подтверждает научную новизну и практическую значимость проведённых исследований для транспортных и сельскохозяйственных машин, эксплуатируемых в различных климатических условиях.

Ключевые слова: дизельный двигатель, турбокомпрессор, входной направляющий аппарат, угол атаки, КПД, топливная экономичность, плотность заряда.

АУЫЛ ШАРУАШАЛЫҒЫ ТЕХНИКАСЫНЫҢ ДИЗЕЛЬДІ ҚОЗҒАЛТҚЫШТАРЫНЫҢ ТИІМДІЛІГІН АРТТЫРУ ҮШІН ТУРБОКОМПРЕССОР ҚАЛАҚШАЛАРЫНЫҢ БҰРЫШЫН ОПТИМИЗАЦИЯЛАУ

Рустембаев А.Б. – философия докторы (PhD), Инжиниринг және азық-түлік технологиялар институт директорының ғылыми-зерттеу жұмыстары және интернационалдандыру жөніндегі орынбасары, «С. Сейфуллин атындағы Қазақ агротехникалық зерттеу университеті» КЕАҚ, Астана қ., Қазақстан Республикасы.