

Сейфуллина», Республика Казахстан, 010000, г. Астана, проспект Женис, 62, тел.: 87011278698, e-mail: lupezo\_83@mail.ru.

Гаджимурадова Айсарат Махмудовна – магистр технических наук, научный сотрудник НИП СХБ, НАО «Казахский агротехнический исследовательский университет имени С. Сейфуллина», Республика Казахстан, 010000, г. Астана, проспект Женис, 62, тел.: 87015543327, e-mail: aisarat3878@mail.ru.

Серікбай Дәурен Айтжанұлы – докторант 2-го курса по специальности 8D08101 – Генетика и селекция сельскохозяйственных культур, НАО «Казахский агротехнический исследовательский университет имени С. Сейфуллина», Республика Казахстан. 010000, г. Астана, проспект Женис, 62, тел.: 87055222420, e-mail: serikbaidauren@gmail.com.

Нуралов Арыстан Серикович\* – 8D08101 «Ауыл шаруашылық дақылдарының генетикасы және селекциясы» мамандығы бойынша 1-курс докторанты, Егіншілік және өсімдік шаруашылығы кафедрасы, С.Сейфуллин атындағы Қазақ агротехникалық зерттеу университеті, Қазақстан Республикасы, 010000, Астана қ, Жеңіс даңғ, 62, тел.: 87477335365, e-mail: nuralov.a@mail.ru.

Зотова Людмила Петровна – PhD, Егіншілік және өсімдік шаруашылығы кафедрасының қауымдастырылған профессор м.а., С.Сейфуллин атындағы Қазақ агротехникалық зерттеу университеті, Қазақстан Республикасы, 010000, Астана қ, Жеңіс даңғ, 62, тел.: 87011278698, e-mail: lupezo\_83@mail.ru.

Гаджимурадова Айсарат Махмудовна – техникалық ғылымдар магистрі, Ауыл шаруашылығы және биология ғылыми-зерттеу институтының ғылыми қызметкері, С.Сейфуллин атындағы Қазақ агротехникалық зерттеу университеті, Қазақстан Республикасы, 010000, Астана қ, Жеңіс даңғ, 62, тел.: 87015543327, e-mail: aisarat3878@mail.ru.

Серікбай Дәурен Айтжанұлы – 8D08101 «Ауыл шаруашылық дақылдарының генетикасы және селекциясы» мамандығы бойынша 2-курс докторанты, С.Сейфуллин атындағы Қазақ агротехникалық зерттеу университеті, Қазақстан Республикасы, 010000, Астана қ, Жеңіс даңғ, 62, тел.: 870552224-20, e-mail: serikbaidauren@gmail.com.

Nuralov Arystan Serikovich\* – 1st-year PhD student, “8D08101-Genetics and breeding of agricultural crops” educational program, Department of agriculture and crop production, S.Seifullin Kazakh Agro Technical Research University NCJSC, Republic of Kazakhstan, 010000, Astana, 62 Zhenis Ave., tel.: 87477335365, e-mail: nuralov.a@mail.ru.

Zotova Lyudmila Petrovna – PhD, acting Associate Professor, Department of agriculture and crop production, S.Seifullin Kazakh Agro Technical Research University NCJSC, Republic of Kazakhstan, 010000, Astana, 62 Zhenis Ave., tel.: 87011278698, e-mail: lupezo\_83@mail.ru.

Gadzhimuradova Aissarat Makhmudovna – Master of Technical Sciences, Researcher, Scientific And Industrial Platform for Agricultural Biotechnology, S.Seifullin Kazakh Agro Technical Research University NCJSC, Republic of Kazakhstan, 010000, Astana, 62 Zhenis Ave., tel.: 87015543327, e-mail: aisarat3878@mail.ru.

Serikbay Dauren Aitzhanuly – 2nd-year PhD student, “8D08101-Genetics and breeding of agricultural crops” educational program, S.Seifullin Kazakh Agro Technical Research University NCJSC, Republic of Kazakhstan, 010000, Astana, 62 Zhenis Ave., tel.: 87055222420, e-mail: serikbaidauren@gmail.com.

МРНТИ: 38.61.31:38.61.91:20.23.27

УДК 556.31, 556.3.04, 556.3.06

<https://doi.org/10.52269/NTDG2541138>

## ИДЕНТИФИКАЦИЯ ЗОН ПОТЕНЦИАЛА ГРУНТОВЫХ ВОД ТЕРРИТОРИИ УЛЫТАУСКОЙ ОБЛАСТИ С ИСПОЛЬЗОВАНИЕМ МЕТОДОВ ГИС И АНР

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

Шагарова Л.В. – кандидат технических наук, младший научный сотрудник Института радиофизики и физической электроники, Омский научный центр СО РАН, г. Омск, Российская Федерация.

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

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

Работа проделана с целью определения потенциальных зон подземных вод Улытауской области с использованием данных дистанционного зондирования Земли (ДЗЗ), геоинформационных систем (ГИС) и аналитического иерархического процесса (АНР). Подземные воды формируются в результате сложного взаимодействия климатических, геоморфологических, геологических и антропогенных факторов. Применение методов ДЗЗ позволяет получать регулярные и масштабируемые данные о состоянии поверхности Земли. ГИС предоставляет инструменты пространственного анализа, а метод АНР – возможность учитывать экспертную оценку важности факторов.

Для достижения поставленной цели предварительно решались следующие задачи:

- Сбор и предварительная обработка пространственных и спутниковых данных, характеризующих природные условия заданного региона;
- Создание тематических слоёв, влияющих на формирование подземного стока: карта плотности дренажа; карта уклонов; карта осадков; геологическая карта региона; карта землепользования/земельного покрова (LULC); карта почв;
- Присвоение весов каждому фактору с использованием метода АНР;
- Многокритериальный пространственный анализ для выделения потенциальных зон;
- Картографическая визуализация и интерпретация результатов.

Полученная на выходе карта исследуемой области содержит 4 потенциальные зоны содержания подземных вод: низкая, средняя, хорошая и очень хорошая. Результаты работы показывают, что на территории Улытауской области две трети региона имеют «низкий потенциал» подземных вод.

**Ключевые слова:** подземные воды; аналитический иерархический процесс; картографирование; плотность дренажа; геологическая карта региона; орошение.

#### ҰЛЫТАУ ОБЛЫСЫ АУМАҒЫНДАҒЫ ЖЕР АСТЫ СУЛАРЫНЫҢ ӨЛЕУЕТТІ АЙМАҚТАРЫН ГИС ЖӘНЕ АНР ӘДІСТЕРІН ПАЙДАЛАНУ АРҚЫЛЫ АЙҚЫНДАУ

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.

Шағарова Л.В. – Радиофизика және физикалық электроника институтының кіші ғылыми қызметкері, «РАН СО Омбы ғылыми орталығы», Омбы қ, Ресей Федерациясы.

Мұртазин Е.Ж. – Директордың 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 қашықтықтан зондтау (РС) деректерін, географиялық ақпараттық жүйелерді (ГАЖ) және аналитикалық иерархиялық процесті (АНР) пайдалана отырып, Ұлытау өңіріндегі жер асты суларының өлеуетті аймақтарын анықтау мақсатында жүргізілді. Жер асты сулары климаттық, геоморфологиялық, геологиялық, антропогендік факторлардың күрделі өзара әрекеттесуінің нәтижесінде қалыптасады. RS әдістерін қолдану Жер бетінің жай-күйі туралы тұрақты және масштабталатын мәліметтерді алуға мүмкіндік береді. ГАЖ кеңістіктік талдау құралдарымен қамтамасыз етеді, ал АНР әдісі факторлардың маңыздылығын сарапшылық бағалауды қосуға мүмкіндік береді.

Осы мақсатқа жету үшін алдын ала келесі міндеттер орындалды:

- берілген аймақтың табиғи жағдайларын сипаттайтын кеңістіктік және спутниктік мәліметтерді жинау және алдын ала өңдеу;
- Жер асты суларының ағынының қалыптасуына әсер ететін тақырыптық қабаттарды құру: дренаждық тығыздық картасы; еңіс картасы; жауын-шашын картасы; аймақтың геологиялық картасы; жерді пайдалану/жер жамылғысының (ЖҚБК) картасы; топырақ картасы;
- АНР әдісі арқылы әрбір факторға салмақтар беру;
- Потенциалды аймақтарды анықтау үшін көп критериялы кеңістіктік талдау;
- Картографиялық визуализация және нәтижелерді интерпретациялау.

Зерттелетін аумақтың картасында жер асты суларының болуы мүмкін төрт аймақ бар: төмен, орташа, жақсы және өте жақсы. Нәтижелер Ұлытау аймағының үштен екісінде жер асты суларының «өлеуетті төмен» екенін көрсетті.

**Түйінді сөздер:** жер асты сулары; талдамалық иерархиялық процесс; картографиялау; дренаждық тығыздығы; өңірдің геологиялық картасы; суару.

## IDENTIFICATION OF GROUNDWATER POTENTIAL ZONES IN THE ULYTAU REGION USING GIS AND AHP METHODS

*Onlassynov 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.*

*Shagarova L.V. – Candidate of Technical Sciences, Junior Researcher of the Institute of Radiophysics and Physical Electronics, Omsk Scientific Center of the Siberian Branch of the Russian Academy of Sciences, Omsk, Russian Federation.*

*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 of the Laboratory of GIS Technologies and Earth Remote Sensing, Akhmedsafin Institute of Hydrogeology and Environmental Geoscience, Satbayev University, Almaty, Republic of Kazakhstan.*

*This study was conducted to identify potential groundwater zones in the Ulytau region using remote sensing (RS) data, geographic information systems (GIS), and the analytical hierarchy process (AHP). Groundwater is formed as a result of the complex interaction of climatic, geomorphological, geological, and anthropogenic factors. The use of RS techniques enables the acquisition of regular, scalable data on the condition of the Earth's surface, while GIS provide powerful tools for spatial analysis. The AHP method facilitates the incorporation of expert judgments regarding the importance of influencing factors.*

*To achieve the research objective, the following steps were carried out:*

- Collection and preprocessing of spatial and satellite data characterizing the natural conditions of the study area;*
- Development of thematic layers influencing groundwater formation, including drainage density map, slope map, precipitation map, geological map of the region, land use/land cover (LULC) map, and soil maps;*
- Assignment of weights to each factor using the AHP method;*
- Multi-criteria spatial analysis to delineate groundwater potential zones;*
- Cartographic visualization and interpretation of the results.*

*The final groundwater potential map of the Ulytau region delineates four categories of groundwater potential: low, moderate, good, and very good. The results indicate that approximately two-thirds of the Ulytau Region fall within the "low potential" category.*

**Key words:** *groundwater; Analytical Hierarchy Process; mapping; drainage density; geological map of the region; irrigation.*

**Введение.** Подземные воды в засушливых областях являются одним из главных природных источников для обеспечения сельскохозяйственных, бытовых и промышленных потребностей. Они позволяют обществу получать огромные социальные, экономические и экологические выгоды, включая адаптацию к изменению климата.

Показателем дефицита воды является степень водообеспеченности, определяемая как отношение прогнозных ресурсов или эксплуатационных запасов к водопотребности. Казахстанскими специалистами представлены данные водопотребности отраслей экономики, а также прогнозные значения водопотребления на 2030 и 2040 гг. [1, с.7].

Предварительно был изучен опыт работ других авторов по данной тематике. Так, например, турецкие специалисты проводили картирование потенциальных зон подземных вод для реки Кызылырмак и оценили высокий и умеренный потенциал большей части территории бассейна [2, с.2].

В карстовом бассейне Цзинань в Китае, ученые проводили расчеты в связи с тем, что чрезмерная эксплуатация и урбанизация привели к пересыханию источников в засушливые сезоны и снижению расхода в последние годы. В работе были использованы такие критерии, как уклон, геология, плотность линиментов, топографический индекс влажности (TWI), осадки, почва, плотность дренажа и землепользование/земельный покров (LULC) [3, с.566].

Индийские исследователи проводили работы для подземных вод района Идукки в Западной Индии. В своей работе они использовали только три алгоритма для машинного обучения [4, с.2426]. В Пакистане работы проводились в районе Мултан, для анализа исследуемой области были рассмотрены восемь значимых факторов, при этом площадь исследуемой территории составляла 3721 км<sup>2</sup> [5, с.111].

Учёные из Эфиопии проводили исследования в водоразделе реки Горезен, с девятью тематическими слоями использовался анализ с весовым наложением [6, с.2774]. Также проводились работы в верхних частях водораздела реки Чемога. Зоны определялись путем наложения десяти влияющих факторов (плотность линеаментов, осадки, геоморфология, литология, уклон, плотность дренажа, шероховатость, землепользование/земельный покров, глубина до уровня грунтовых вод и высота) на платформе ArcGIS [7, с.1069].

Американские сотрудники картировали бассейн реки Верде и зону активного управления Прескотт. Их рекомендации в работе включают в себя регулярную интеграцию данных о землепользовании и климате в оценки уязвимости, усиление контроля за землепользованием в зонах высокого риска, продвижение адаптивных методов управления и повышение осведомленности общественности для снижения рисков загрязнения [8, с.58].

Площадь территории Улытауской области – 188,9 тыс. км<sup>2</sup>. Регион лежит в пределах Казахского мелкосопочника – платформа палеозойско-кайнозойского возраста с фундаментом из гранитов и сланцев, покрытым различной осадочной толщей (глина, песок, мергель, известняк, песчаник). Горные породы Улытау – главным образом граниты, кора изрезана оврагами и временными водотоками. Плоские степи, низкий гористый массив, корни гранитные, расчленённые склоны. Климат резко континентальный, полупустынный, сухой, с пыльными бурями. Средняя температура января колеблется от –18 °С на С., до –14 °С на юге области. Средняя температура июля колеблется от +18 °С до +22 °С. На территории области ведётся добыча меди, золота, нефти/газа, угля, редкоземельных металлов. Гидрографическая сеть Улытауской области в основном представлена сезонными реками с весенним паводком и пересыхающими руслами летом. Ключевые водотоки – Каракенгир, Терисакан, Калмак-кырган, при этом большинство вод остаются в малых притоках и временных ручьях.

В регионе расположены крупные артезианские бассейны, включая Сарысу Бетпақдала (≈ 206 млрд м<sup>3</sup>), Мынбулак (≈ 180 млрд м<sup>3</sup>) и Улытау (≈ 30 млрд м<sup>3</sup>). Это слабоминерализованные пресные воды, но их уровень использования остаётся пока очень низким.

**Цель.** Оценить наличие потенциальных зон залегания подземных вод территории Улытауской области. Масштаб исследования региональный.

**Задачи.** Создание тематических слоёв, влияющих на формирование подземного стока; использование метода АНР; проведение многокритериального пространственного анализа; картирование и интерпретация полученных результатов.

**Материалы и методы.** Для работы были выбраны 6 критериев, влияющих на формирование подземного стока (таблица 1).

Таблица 1 – Критерии анализа

Фактор	Обоснование
Плотность дренажа (Drainage density)	контролирует распределение стока и скорость инфильтрации
Количество осадков (Rainfall)	основной источник воды
Склон (Slope)	приводит в движение энергию потока воды
Карта землепользования/земельного покрова (LULC)	влияет на уровень инфильтрации и загрязнение
Почва (Soil)	определяет скорость инфильтрации
Геология (Geology)	определяет пористость и проницаемость почв

Каждый созданный фактор нормализуется и пересчитывается в единый формат: растр, единого полигона и единой проекции (GCS\_WGS\_1984 – Geographic Coordinate System, World Geodetic System 1984 – это географическая система координат, которая использует эллипсоид WGS 84 для определения местоположения, задает координаты в градусах широты и долготы). Обработка пространственных данных проводилась в ПО ArcGIS.

**Плотность дренажа (Drainage density):** для оценки плотности дренажной сети исследуемой территории использована SRTM с разрешением 30 м, полученная на сайте Геологической службы США (в свободном доступе).

В процессе создания карты на первом этапе выравнивается поверхность снимка для обеспечения непрерывности стока (Fill Sinks); на следующем этапе определяется направление стока (Flow Direction) и формируются ячейки; затем проводится расчёт накопления стока (Flow Accumulation) – определение потенциальных участков формирования ручьёв и рек и извлечение линейной дренажной сети с помощью порогового значения накопления; и на конечном этапе идет расчёт плотности дренажа (Line Density), в которой плотность рассчитывается как отношение общей длины водотоков к площади ячейки анализа.

На выходе программа рассчитала плотность линейных объектов (в данном случае, рек или ручьёв) в пределах каждой ячейки растра. В результате получили растровое изображение, где значения пикселей отражают плотность водотоков на единицу площади. Результат обработки показывает, где водотоки более или менее сконцентрированы.

Плотность дренажа является важным морфометрическим параметром, характеризующим степень разветвлённости речной сети и водоотводной способности рельефа. Высокие значения наблюда-

ются в зонах с расчленённым рельефом и водоупорными породами, низкие – в областях с плоским рельефом или хорошо фильтрующими породами.

Полученная карта плотности дренажа была классифицирована по грациям (низкая, средняя, высокая) и использована в дальнейшем в качестве одного из тематических слоёв при построении карты потенциала подземных вод.

*Количество осадков (Rainfall)*: для определения климатической нагрузки исследуемого региона использованы метеоданные – годовая норма осадков, с сайта Climatic Research Unit (University of East Anglia) и NCAS (в свободном доступе). Было использовано значение среднегодовых осадков в миллиметрах. Данные об осадках были использованы для построения тематической карты, отражающей их пространственную вариацию по территории исследования.

Для получения непрерывной карты распределения осадков была применена процедура пространственной интерполяции, с наложением административных границ области. Параметры интерполяции были выбраны на основе плотности точек и рельефных особенностей территории. Полученный растровый слой был переклассифицирован на несколько категорий осадков с целью удобства визуального анализа. В результате была создана пространственно-интерполированная карта среднегодового распределения осадков на территории Улытауской области. Согласно полученным данным, меньше всего осадков приходится на южные районы региона, тогда как северные районы области более дождливы. Полученный растр является одним из основных входных слоёв для последующего многокритериального анализа зон потенциала грунтовых вод.

*Уклон (Slope)*. Уклоны местности напрямую влияют на инфильтрацию и сток. Рельеф местности оказывает существенное влияние на распределение поверхностного и подземного стока. Для анализа этого фактора была создана карта уклонов, основанная на SRTM, с использованием инструментов пространственного анализа в ArcGIS. SRTM была импортирована в ArcGIS и приведена к единой проекционной системе, соответствующей всей геобазе проекта. Для расчёта уклона применен инструмент «Slope», в данной работе использовано значение в градусах, что удобно для оценки склонности к инфильтрации. Результатом стал растровый слой, в котором каждому пикселю присвоено значение уклона поверхности. Каждому классу было присвоено соответствующее значение значимости (вес), отражающее его вклад в аккумуляцию подземных вод. Для наглядности применён градиент цветовой палитры (от светло-зелёного для пологих участков до коричневого и тёмно-красного для крутых склонов).

Созданная карта уклонов предоставила детализированную информацию о морфологических характеристиках рельефа Улытауской области и послужила одним из ключевых входных параметров в процедуре взвешенного наложения (Weighted Overlay) при построении финальной карты зон потенциала грунтовых вод.

*Карта землепользования/земельного покрова (LULC)*. Характер землепользования и типы растительного покрова оказывают значительное влияние на водный баланс территории, включая инфильтрацию, испарение и поверхностный сток. В работе были использованы готовые данные с сайта Copernicus Global Land Cover, созданные на основе снимков Sentinel-2 L2A, с разрешением 10 м, в системе координат Universal Transverse Mercator (UTM) WGS84, отображаемая переменная за 2024 год (в свободном доступе).

После классификации или загрузки готовых данных была выполнена переклассификация типов землепользования с учётом их влияния на инфильтрацию и потенциал подземных вод. Были выделены такие переменные как: вода, цветущая растительность, поселения, голая земля и участки агрокультур.

*Почва (Soil)*. Почвенные характеристики напрямую влияют на фильтрационные свойства земной поверхности и, как следствие, на потенциал аккумуляции подземных вод. Почвы, их структура и водопроницаемость определяют скорость инфильтрации осадков и задержку влаги в верхних горизонтах.

Глобальные данные о почвах были получены с сайта «Продовольственная и сельскохозяйственная организация Объединённых Наций», инструмент оценки почвы и воды SWAT (в свободном доступе). По результатам построения почвенной карты, в основном на территории Улытауской области оказался гранулометрический состав почв, содержащий: суглинков, глину, глинистый суглинок, а также песчаный суглинок в наименьшей степени.

*Геология (Geology)* определяет пористость, трещиноватость, проницаемость участков земли. Для получения геологических данных региона были использованы материалы с сайта Геологической службы США, World Geologic Maps. Исходные данные о геологических формациях, типах пород и возрастных единицах представлены в векторном формате (shapefile). Созданный растр геологии региона позволил выделить литологические зоны с разной проницаемостью и водоносным потенциалом.

Метод аналитического иерархического процесса позволяет обоснованно определить весовую значимость каждого из факторов на основе экспертной оценки и математической обработки парных сравнений. АНР формирует матрицы парных сравнений (рисунок 1).

Каждый критерий сравнивается с каждым другим по шкале Саати (от 1 до 9), отражающей степень предпочтения одного фактора перед другим (таблица 2-3).

Matrix											normalized principal Eigenvector
	Drainage density	Rainfall	Slope	LULC	Soil	Geology	0	0	0	0	
Drainage density	1	3	5	3	5	1	-	-	-	-	33,85%
Rainfall	2	1/3	9	5	5	3	-	-	-	-	31,90%
Slope	3	1/5	1/9	1	3	1	-	-	-	-	7,97%
LULC	4	1/3	1/5	1	1	3	-	-	-	-	10,19%
Soil	5	1/5	1/5	1/3	1	1	-	-	-	-	5,94%
Geology	6	1	1/3	1	1/3	1	-	-	-	-	10,15%
0	7	-	-	-	-	-	1	-	-	-	0,00%
0	8	-	-	-	-	-	-	1	-	-	0,00%
0	9	-	-	-	-	-	-	-	1	-	0,00%
0	10	-	-	-	-	-	-	-	-	1	0,00%

Рисунок 1 – Результирующая матрица парных сравнений критериев

Таблица 2 – Шкала значений критериев Саати

Значение	Интерпретация
1	Равная важность
3	Умеренно более важен
5	Сильно более важен
7	Намного более важен
9	Абсолютно более важен
2, 4, 6, 8	Промежуточные значения

АНР суммирует значения по каждому столбцу, каждый элемент матрицы делится на сумму своего столбца (нормализация), затем рассчитывается среднее значение по строкам – это и есть вес каждого критерия.

Весовая доля критериев (W) доля от 1: Drainage density – 0.338; Rainfall – 0.319; Slope – 0.080; LULC – 0.102; Soil – 0.059; Geology – 0.102 (таблица 3).

Для надёжности АНР-анализа важно убедиться, что оценки в матрице логически согласованы. Это делается через расчёт индекса согласованности и коэффициента согласованности (CR):

$$CI = \frac{\lambda_{\text{Макс}} - n}{n - 1} \quad (1)$$

$$CR = \frac{CI}{RI} \quad (2)$$

где:

$\lambda_{\text{Макс}}$  – максимальное собственное значение матрицы, согласно данным работы = 6

n – число критериев,

RI – индекс случайной согласованности (например, при n=6, RI=1.24)

По результатам  $CR < 0.1$  – согласованность допустима.

Таблица 3 – Матрица критериев 6\*6

Критерий	Drainage	Rainfall	Slope	LULC	Soil	Geology
Drainage	1.000	1.06	4.23	3.31	5.73	3.31
Rainfall	0.94	1.000	3.99	3.13	5.41	3.13
Slope	0.24	0.25	1.000	0.78	1.36	0.78
LULC	0.30	0.32	1.28	1.000	1.73	1.000
Soil	0.17	0.18	0.73	0.58	1.000	0.58
Geology	0.30	0.32	1.28	1.000	1.73	1.000

Многокритериальный пространственный анализ в ArcGIS выполнен с использованием инструмента Weighted Overlay на основе шести ключевых факторов: плотность дренажа, количество осадков, уклон, землепользование/земельный покров (LULC), тип почвы и геология. Все слои были приведены



к единому пространственному разрешению и классифицированы по шкале от 1 до 9. Веса факторов были рассчитаны методом АНР и использованы в процессе взвешивания.

**Результаты.** Результатом анализа стала интегральная карта, отражающая пространственное распределение зон с различным потенциалом аккумуляции грунтовых вод (рисунок 2).

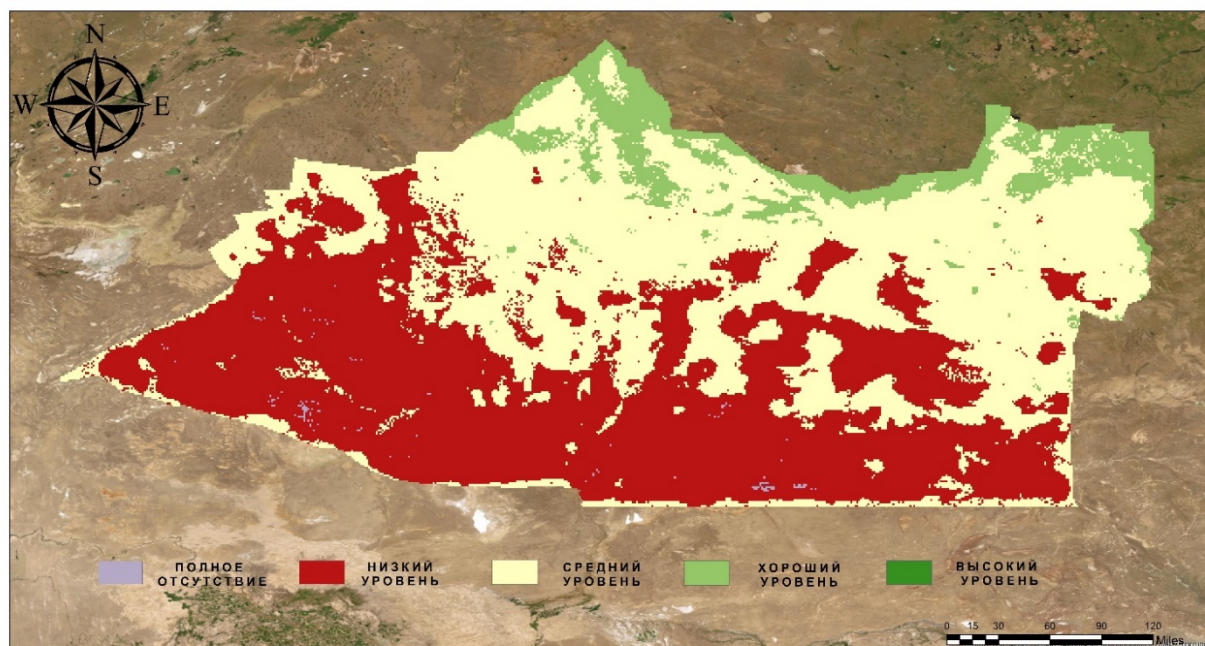


Рисунок 2 – Интегральная карта потенциала грунтовых вод  
Улытауской области Центрального Казахстана

**Заключение.** В результате выполнения многокритериального пространственного анализа (MCDA) с применением метода аналитического иерархического процесса и инструментов геоинформационных систем (ArcGIS), была разработана карта потенциальных зон распространения подземных вод на территории Улытауской области. В процессе анализа были использованы шесть ключевых факторов: плотность дренажной сети, количество осадков, уклон рельефа, землепользование и покров, почвенные характеристики и геологическое строение изучаемой территории.

На основании интегральной оценки факторов, получены следующие результаты распределения территории по уровням потенциала подземных вод:

- 0,2% площади характеризуются как зоны полного отсутствия подземных вод;
- 45,8% занимают территории с низким уровнем потенциала;
- 46,2% отнесены к зонам со средним потенциалом;
- 7,8% площади составляют территории с хорошим потенциалом аккумуляции грунтовых вод.

Надо отметить, что зоны с высоким уровнем содержания подземных вод фактически отсутствуют. Эти результаты свидетельствуют о преобладании зон с низким и средним потенциалом, особенно в южной части области, что связано, вероятно, с комплексом геологических, климатических и морфометрических особенностей региона. Хороший потенциал наблюдается локально, в северных частях и, скорее всего, приурочен к участкам с благоприятным сочетанием проницаемых геологических формаций, незначительным уклоном и благоприятным типом землепользования (например, естественные растительные покровы или аллювиальные равнины).

Комплексный подход обеспечивает более объективную и воспроизводимую оценку потенциальных водоносных зон. Построенная модель может быть использована не только в целях орошаемого земледелия, но также в планировании водопользования, бурения разведочных скважин, и как основа для устойчивого управления водными ресурсами региона.

**Информация о финансировании.** Финансирование данного исследования было обеспечено Комитетом науки Министерства науки и высшего образования Республики Казахстан: № BR 21882211 «Ресурсы подземных вод как основной резерв устойчивого орошаемого земледелия Казахстана».

#### ЛИТЕРАТУРА:

1. Absametov, M. K., Onglassynov, Z. A., Shagarova, L. V., Muratova, M. M. Gis-assessment of groundwater supply to population and branches of economy of kazakhstan with account to long-term water demand [Текст] / M. K. Absametov, Z. A. Onglassynov, L. V. Shagarova, M. M. Muratova // News of the National Academy of Sciences of the Republic of Kazakhstan, Series of Geology and Technical Sciences. – 2022. – № Vol. 6, no. 456. – С. 6–18. <https://doi.org/10.32014/2518-170x.234>.

2. Beden, N., Soydan-Oksal, N.G., Ariman, S., Ahmadzai, H. Delineation of a Groundwater Potential Zone Map for the Kızılırmak Delta by Using Remote-Sensing-Based Geospatial and Analytical Hierarchy Processes [Текст] / N. Beden, N.G.Soydan-Oksal, S.Ariman, H.Ahmadzai // Sustainability. – 2023. – № 15(14), 10964. – C.2-21. <https://doi.org/10.3390/su151410964>.
3. Portia Annabelle Opoku, Longcang Shu, George Kwame Amoako-Nimako Assessment of Groundwater Potential Zones by Integrating Hydrogeological Data, Geographic Information Systems, Remote Sensing, and Analytical Hierarchical Process Techniques in the Jinan Karst Spring Basin of China [Текст] / Portia Annabelle Opoku, Longcang Shu, George Kwame Amoako-Nimako // Water. – 2024. – № 16(4). – C. 566. <https://doi.org/10.3390/w16040566>.
4. Zohaib Ahmed Khan, Bharat Jhamnani Identification of groundwater potential zones of Idukki district using remote sensing and GIS-based machine-learning approach [Текст] / Zohaib Ahmed Khan, Bharat Jhamnani // Water Supply. – 2023. – № 23(6). – C. 2426–2446. <https://doi.org/10.2166/ws.2023.134>.
5. Anila Anwar, Awais Munir, Noor Fatima, Ahsan Majeed, Hafeez Muhammad Rafiq, Imran Ahmed Modelling of Groundwater Potential Zones by using GIS and Remote Sensing Techniques: A Case Study of Multan District [Текст] / Anila Anwar, Awais Munir, Noor Fatima, Ahsan Majeed, Hafeez Muhammad Rafiq, Imran Ahmed // iRASD Journal of Energy & Environment. – 2024. – № 5(2). – C. 111–130. <https://doi.org/10.52131/jee.2024.0502.0048>.
6. Gashaw Adugna Mulu, Mulu Sewinet Kerebih, Dawit Asregedew Hailu Groundwater perspective zone mapping coupled with remote sensing, GIS, AHP, and MIF models: a case study of the Gorezen watershed, Ethiopia [Текст] / Gashaw Adugna Mulu, Mulu Sewinet Kerebih, Dawit Asregedew Hailu // Water Practice & Technology. – 2024. – № 19(7). – C. 2774–2798. <https://doi.org/10.2166/wpt.2024.179>.
7. Anila Anwar, Awais Munir, Noor Fatima, Ahsan Majeed, Hafeez Muhammad Rafiq, Imran Ahmed Groundwater potential zones delineation using GIS and AHP techniques in upper parts of Chemoga watershed, Ethiopia [Текст] / Anila Anwar, Awais Munir, Noor Fatima, Ahsan Majeed, Hafeez Muhammad Rafiq, Imran Ahmed // Applied Water Science. – 2024. – № 14(85). – C. 1069-1081. <https://doi.org/10.1007/s13201-024-02119-0>.
8. Williams, S.A., Megdal, S.B., Zuniga-Teran, A.A., Quanrud, D.M., Christopherson, G. Mapping Groundwater Vulnerability in Arid Regions: A Comparative Risk Assessment Using Modified DRASTIC Models, Land Use, and Climate Change Factors [Текст] / Williams, S.A., Megdal, S.B., Zuniga-Teran, A.A., Quanrud, D.M., Christopherson, G. // Land. – 2025. – № 14(1). – C. 58.

## REFERENCES:

1. Absametov M.K., Onglassynov Z.A., Shagarova L.V., Muratova M.M. GIS-assessment of groundwater supply to population and branches of economy of Kazakhstan with account to long-term water demand. *News of the National Academy of Sciences of the Republic of Kazakhstan, Series of Geology and Technical Sciences*, 2022, vol. 6, no. 456, pp. 6–18. <https://doi.org/10.32014/2518-170x.234>.
2. Beden N., Soydan-Oksal N.G., Ariman S., Ahmadzai H. Delineation of a groundwater potential zone map for the Kızılırmak Delta by using remote-sensing-based geospatial and analytical hierarchy processes. *Sustainability*, 2023, vol. 15, iss. 14, art. 10964, pp. 2-21. <https://doi.org/10.3390/su151410964>.
3. Opoku P.A., Shu L., Amoako-Nimako G.K. Assessment of groundwater potential zones by integrating hydrogeological data, geographic information systems, remote sensing, and analytical hierarchical process techniques in the Jinan Karst Spring Basin of China. *Water*, 2024, vol. 16, iss. 4, art. 566. <https://doi.org/10.3390/w16040566>.
4. Khan Z.A., Jhamnani, B. Identification of groundwater potential zones of Idukki district using remote sensing and GIS-based machine-learning approach. *Water Supply*, 2023, vol. 23, iss. 6, pp. 2426–2446. <https://doi.org/10.2166/ws.2023.134>.
5. Anwar A., Munir A., Fatima N., et al. Modelling of groundwater potential zones by using GIS and remote sensing techniques: A case study of Multan District. *iRASD Journal of Energy & Environment*, 2024, vol. 5, no. 2, pp. 111–130. <https://doi.org/10.52131/jee.2024.0502.0048>.
6. Mulu G.A., Kerebih M.S., Hailu D.A. Groundwater perspective zone mapping coupled with remote sensing, GIS, AHP, and MIF models: A case study of the Gorezen watershed, Ethiopia. *Water Practice & Technology*, 2024, vol. 19, iss. 7, pp. 2774–2798. <https://doi.org/10.2166/wpt.2024.179>.
7. Anwar A., Munir A., Fatima, N., et al. Groundwater potential zones delineation using GIS and AHP techniques in upper parts of Chemoga watershed, Ethiopia. *Applied Water Science*, 2024, vol. 14, art. 85. <https://doi.org/10.1007/s13201-024-02119-0>.
8. Williams S.A., Megdal S.B., Zuniga-Teran A.A., Quanrud D.M., Christopherson G. Mapping groundwater vulnerability in arid regions: A comparative risk assessment using modified DRASTIC models, land use, and climate change factors. *Land*, 2025, vol. 14, iss. 1, art. 58. <https://doi.org/10.3390/land14010058>.



**Сведения об авторах:**

Оңласынов Жұлдызбек Әліханұлы\* – доктор философии (PhD), заведующий лабораторией ГИС-технологий и ДЗЗ, Институт гидрогеологии и геоэкологии им У.М. Ахметсафина, Satbayev University, Республика Казахстан, 050010, г. Алматы, ул. Валиханова 94, тел.: 877716217511, e-mail: zhuldyzbek.onlasynov@mail.ru.

Шагарова Людмила Валентиновна – кандидат технических наук, член РосГидроГео, младший научный сотрудник Института радиофизики и физической электроники, Омский научный центр Сибирского отделения РАН, Российская Федерация, 644024, г. Омск, пр. Карла Маркса 15, тел.: 8(3812) 37-17-36, e-mail: igg\_gis-dzz@mail.ru.

Муртазин Ермек Жамшитович – кандидат геолого-минералогических наук, заместитель директора по науке, Институт гидрогеологии и геоэкологии им У.М. Ахметсафина, Satbayev University, Республика Казахстан, 050010, г. Алматы, ул. Валиханова 94, тел.: 8(727) 291-50-31, e-mail: ye\_murtazin@list.ru.

Муратова Мира Муратовна – ведущий инженер лаборатории ГИС-технологий и ДЗЗ, Институт гидрогеологии и геоэкологии им У.М. Ахметсафина, Satbayev University, Республика Казахстан, 050010, г. Алматы, ул. Валиханова 94, тел.: 8(727) 291-46-86, e-mail: doc-mira@mail.ru.

Оңласынов Жұлдызбек Әліханұлы\* – PhD докторы, ГАЖ технологиялары және қашықтықтан зондтау зертханасының меңгерушісі, Ұ.М. Ахметсафин атындағы Гидрогеология және геоэкология институтының Satbayev University, Қазақстан Республикасы, 050010, Алматы қ., Уәлиханов көш. 94, тел.: 87716217511, e-mail: zhuldyzbek.onlasynov@mail.ru.

Людмила Валентиновна Шагарова – техника ғылымдарының кандидаты, RosHydroGeo мүшесі, Омбы ғылыми орталығының Радиофизика және физикалық электроника институтының кіші ғылыми қызметкері, Ресей ғылым академиясының Сібір бөлімшесі, Ресей Федерациясы, Омск қ, Карл Маркс даңғ, 15, тел.: 8(3812) 37-17-36, e-mail: igg\_gis-dzz@mail.ru.

Ермек Жәмшитұлы Муртазин – геология-минералогия ғылымдарының кандидаты, директордың ғылым жөніндегі орынбасары, Ұ.М. Ахметсафин атындағы Гидрогеология және геоэкология институты, Satbayev University, Қазақстан Республикасы, 050010, Алматы қ., Уәлиханов көш, 94, тел.: 8 (727) 291-50-31, e-mail: ye\_murtazin@list.ru.

Мұратова Мира Мұратқызы – ГАЖ технологиялары және қашықтықтан зондтау зертханасының жетекші инженері, Ұ.М. Ахметсафин атындағы Гидрогеология және геоэкология институты, Satbayev University, Қазақстан Республикасы, 050010, Алматы қ., Уәлиханов көш. 94, тел.: 8(727) 291-46-86, e-mail: doc-mira@mail.ru.

Onlassynov Zhuldyzbek Alikhanuly\* – PhD, Head of the Laboratory of GIS Technologies and Earth Remote Sensing, Akhmedsafin Institute of Hydrogeology and Environmental Geoscience, Satbayev University, Republic of Kazakhstan, 050010, Almaty, 94 Valikhanov Str., tel.: 87716217511, e-mail: zhuldyzbek.onlasynov@mail.ru.

Shagarova Lyudmila Valentinovna – Candidate of Technical Sciences, Member of RosHydroGeo, Junior Researcher of the Institute of Radiophysics and Physical Electronics, Omsk Scientific Center of the Siberian Branch of the Russian Academy of Sciences, Russian Federation, 644024, Omsk, 15 Karl Marx Ave., tel.: +7 (3812) 37-17-36, e-mail: igg\_gis-dzz@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.: +7 (727) 291-50-31, e-mail: ye\_murtazin@list.ru.

Muratovna Muratova Mira – Leading Engineer of the Laboratory of GIS Technologies and Earth Remote Sensing, Akhmedsafin Institute of Hydrogeology and Environmental Geoscience, Satbayev University, Republic of Kazakhstan, 050010, Almaty, 94 Valikhanov Str., tel.: +7(727) 291-46-86, e-mail: doc-mira@mail.ru.

МРНТИ:68.85.81

УДК 631.372.8:621.785.5

<https://doi.org/10.52269/NTDG2541146>

### **СРАВНИТЕЛЬНЫЙ АНАЛИЗ ТЕХНОЛОГИЙ УПРОЧНЕНИЯ ЛЕМЕХОВ ДЛЯ УСЛОВИЙ СЕВЕРНОГО КАЗАХСТАНА**

Салыков Б.Р. – кандидат технических наук, ассоциированный профессор (доцент) кафедры аграрной техники и транспорта, НАО «Костанайский региональный университет имени Ахмет Байтұрсынұлы», г. Костанай, Республика Казахстан.