https://doi.org/10.55764/2957-9856/2026-3-9-23.31

МРНТИ 36.33.27; 70.21.31
УДК 631.674; 004.85; 528.8

Қ. Т. Қырғызбай[*1], Н. Э. Бекмухамедов[2], А. С. Егизбаева[3], К. В. Константинова[4]

[1 *]PhD, ведущий научный сотрудник, доцент-исследователь
(Национальный центр космических исследований и технологий, Казахский национальный университет имени аль-Фараби, Алматы, Казахстан; ***kyrgyzbay.kudaibergen@gmail.com***)
[2] К. с.-х. н., директор департамента ДЗЗ (Национальный центр космических исследований и технологий, Алматы, Казахстан; *nurlan1964@yandex.ru*)
[3] PhD, заведующая лабораторией «космический мониторинг сельскохозяйственного производства» (Национальный центр космических исследований и технологий, Алматы, Казахстан; *sin.asset@gmail.com*)
[4] PhD, старший научный сотрудник (Национальный центр космических исследований и технологий, Алматы, Казахстан; *k.konstantinova@spaceres.kz*)

ГИДРОМОДУЛЬНОЕ РАЙОНИРОВАНИЕ СЕЛЬСКОХОЗЯЙСТВЕННЫХ ЗЕМЕЛЬ С ПРИМЕНЕНИЕМ ВЕБ-ГИС ТЕХНОЛОГИЙ

Аннотация. Орошение сельскохозяйственных земель играет ключевую роль в обеспечении продовольственной безопасности в условиях роста численности населения и усиления неблагоприятных природно-климатических факторов. Рациональное использование водных ресурсов требует комплексного учета климатических, почвенных и гидрогеологических условий. Одним из наиболее подходящих методов деления территории орошаемых сельскохозяйственных земель с целью высокоэффективного использования земельно-водных ресурсов в аридной Центральной Азии является гидромодульное районирование. Это исследование посвящено гидромодульному районированию сельскохозяйственных земель Жамбылской области с применением Веб-ГИС технологий и дистанционного зондирования. Целью является оптимальное распределение орошаемых полей по гидромодульным районам с учетом климатических, гидрографических, почвенных условий и уровня грунтовых вод в рамках административного деления области. В исследовании использовались открытые векторные и растровые данные, космические снимки Sentinel-2A/2B для определения границ орошаемых земель и SRTM для анализа абсолютной высоты и уклонов. Данные OpenStreetMap применялись для определения административных границ. Геопространственный анализ и обработка данных выполнялись в ArcGIS. Методика основывалась на исследованиях казахстанских и узбекистанских ученых, включая труды КазНИИ земледелия и растениеводства и КазНИИ водного хозяйства. В результате исследования созданы Веб картографические материалы гидромодульного районирования, определены пространственное распределение и площади гидромодульных районов, а также комплексная информация по каждому району. Результаты интегрированы в Веб-ГИС с использованием ArcGIS WebApp Builder и могут служить основой для дальнейших исследований изменения климата и рационального использования водных ресурсов.

Ключевые слова: гидромодульное районирование, пространственный анализ, ГИС, ДЗЗ, орошаемые земли, Веб-ГИС.

Введение. Ведение орошаемого земледелия во всем мире зависит, в главную очередь, от водных ресурсов, их количества и качества. В период до 2050 года перед сельским хозяйством стоят сложные задачи, связанные с продовольственной безопасностью населения. По данным ФАО с увеличением численности населения вырастет и водопотребление в разных направлениях, в том числе и в сфере сельского хозяйства. Проблемы, связанные с водой в сельском хозяйстве, можно группировать по потребностям в производстве большого количество еды с меньшим использо-

ванием водных ресурсов, по мерам по повышению устойчивости фермерских сообществ к неблагоприятным природным явлениям (засуха и наводнение), а также по применению технологий чистой воды, которые защищают окружающую среду. Оптимальное и природоориентированное использование водных ресурсов требуют модернизации ирригационных систем для продуктивной и менее вредной эксплуатации для окружающей среды [1].

Более 70% пресной воды используется для орошения сельскохозяйственных культур [2]. Орошаемое земледелие обеспечивает 40% продовольствия в мире с менее чем 20% посевных площадей, что подчеркивает важность орошения в глобальной продовольственной безопасности [3]. Орошаемое растениеводство во всем мире занимает площадь более 275 млн га, с предполагаемым ежегодным приростом в 1,3% [4, 5]. В условиях роста потребности в продовольствии и ограниченности водных ресурсов центральным вопросом выступает повышение эффективности управления орошением в сельском хозяйстве.

Одним из инновационных подходов в решении данной задачи является применение методов машинного обучения при планировании орошения, что позволяет более точно определить потребность сельскохозяйственных культур в воде, оптимизировать полив по срокам и объемам, и в последующем повысить эффективность использования водных ресурсов [6, 7]. Вместе с тем широкое внедрение методов машинного обучения ограничивается недостатком доступных данных, ограничениями их обмена и отсутствием надёжной оценки неопределённости прогнозов [8]. Это обусловливает необходимость внедрения валидированных моделей, способных обеспечить более обоснованное и устойчивое управление орошением.

Особенно актуальна данная задача для Центральной Азии, где дефицит водных ресурсов и последствия изменения климата усиливают необходимость рационального водопользования в сельском хозяйстве. В связи с этим для выбора оптимальной системы водопотребления сельскохозяйственных культур с учётом природно-климатических условий региона и перспектив изменения климата были рассмотрены исследования, посвящённые гидромодульному районированию территории Центральной Азии. Многочисленные исследования Стулиной Г. В., Солодкого Г. Ф. и Курбановой К. выполнены с применением методики ФАО и данных программы «Коперникус», проведены практические работы по оценке потребности в воде для орошения сельскохозяйственных территорий четырех областей Ферганской долины в Узбекистане (результаты сотрудничества с Лиссабонским аграрным университетом, Университетом Гогенхайм, ФРГ в рамках проекта Rivertwin и проекта «ИУВР-Фергана»). Ученые взяли за классификационную основу гидромодульное районирование, разработанное под руководством А. Н. Костякова. Приведенное районирование было изменено по методике ФАО-24 и ФАО-56, и создано программное обеспечение PROGWAT. Результаты исследования были апробированы и внедрены в практику орошаемых полей в Ферганской долине общей площадью 130 тыс. га. Приведенные мероприятия позволили снизить водозабор в среднем на 200 млн $м^3$ воды [9].

Исследованиями, связанными с гидромодульным районированиям орошаемых земель на территории Казахстана, занимались КазНИИ водного хозяйства и КазНИИ земледелия и растениеводства. К. У. Балгабеков и А. Капашев применяли гидромодульное районирование на территорию юго-востока Казахстана и разработали карты-схемы для оптимального водопользования в районах орошаемого земледелия Алматинской, Талдыкорганской и Жамбылской областей [10].

В Казахстане площадь орошаемых земель составляет 1,6 млн га, 90% которых расположены в южных областях. В течение 5 лет планируется восстановление 600 тыс. га орошаемых земель (до 2,2 млн га), с 2025 по 2030 год новых орошаемых земель будет 800 тыс. га. Для поставленных целей необходимы комплекс работ по реконструкции каналов, строительство водохранилищ и создание оптимального водопотребления. Следующим актуальным вопросом является цифровизация для экономии водных ресурсов при транспортировке и распределении [11, 12].

Научная новизна этого исследования заключается в формировании новой пространственной структуры гидромодульного районирования орошаемых земель Жамбылской области Республики Казахстан с выделением 9 гидромодульных районов на основе интеграции данных дистанционного зондирования Земли, пространственных и статистических данных с применением современных ГИС-технологий и последующей визуализацией результатов в Web-GIS, что обеспечивает более детализированную пространственную основу для водопланирования и управления орошаемым земледелием. Гидромодульное районирование выполнено с использованием открытых и оциф-

рованных векторных данных, растровой информации, статистических данных и методов визуализации в Web-GIS среде.

Материалы и методы. Объектом исследования являлись орошаемые земли, расположенные в Жамбылской области (рисунки 1, 2). Изученная административная единица расположена на юго-востоке Казахстана между 42^0 и 45^0 северной широты, 68^0 и 75^0 восточной долготы. Общая площадь составляет 144 264 км^2.

Алгоритм выполнения работ построен на основе анализа литературы по гидромодульному районированию [13, 14], обработки данных, технической характеристики выбранного программного обеспечения и состоит из следующих этапов:

1) векторизация полей орошаемого земледелия на основе космических снимков;

2) обработка и анализ векторной геопространственной информации механического состава почв и уровня грунтовых вод;

3) обработка растровой информации цифровой модели рельефа (ЦМР), создание данных об уклоне местности;

4) присвоение данных о механическом составе почв, уровне грунтовых вод и показателях уклона местности к векторизованным полям орошаемого земледелия;

5) процесс районирования орошаемых земель на отдельные гидромодульные районы;

6) создание картографических материалов и визуализация результатов на основе Веб-приложения ArcGIS Web App Builder, каждый этап проиллюстрирован на рисунке 3.

Картографические материалы и данные дистанционного зондирования. Официальные картографические материалы предназначены для пространственного определения границ орошаемых земель в Жамбылской области. Данные о границах орошаемых земель получены на основе комплексной карты земельных угодий (масштаб 1: 300 000) (https://e-jambyl.kz/), а также путем обработки «Карты размещения площадей регулярного и лиманного орошения», предоставленного ПК Институтом «Казгипроводхоз», масштаб 1: 3 000 000 [15].



Рисунок 1 – Карта административно-территориального деления Жамбылской области

Figure 1 – Map of the administrative-territorial division of Zhambyl region



Рисунок 2 – Орошаемые земли Жамбылской области

Figure 2 – Irrigated lands of Zhambyl region



Рисунок 3 – Алгоритм выполнения работ по гидромодульному районированию орошаемых земель Жамбылской области

Figure 3 – Algorithm of work on hydromodular zoning of irrigated lands of Zhambyl region

Определение границ орошаемых полей и создание поверхности ЦМР проводились с применением космических и радарных снимков. Для создания мозаики растровых снимков использованы данные Sentinel 2A/2B (https://www.sentinel-hub.com/) и Shuttle Radar Topography Mission (SRTM) (https://earthexplorer.usgs.gov/) [16, 17].

Векторная геопространственная информация. При анализе орошаемых земель использованы векторные файлы открытого типа (административно-территориальное деление) и оцифрованные данные (механический состав почв и уровень грунтовых вод). Административно-территориальные данные получены из открытого источника https://osm-boundaries.com/.

Векторные файлы Open street map (OSM) являются открытой базой географических данных [18], обновляемых участниками в рамках открытого сотрудничества. Предоставляемые данные собираются на основе аэрофотосъемок и интеграции других открытых источников информации с последующей обработкой. Векторные данные OSM широко используются при создании электронных карт, навигационных технологий и визуализации топографической ситуации местности [19].

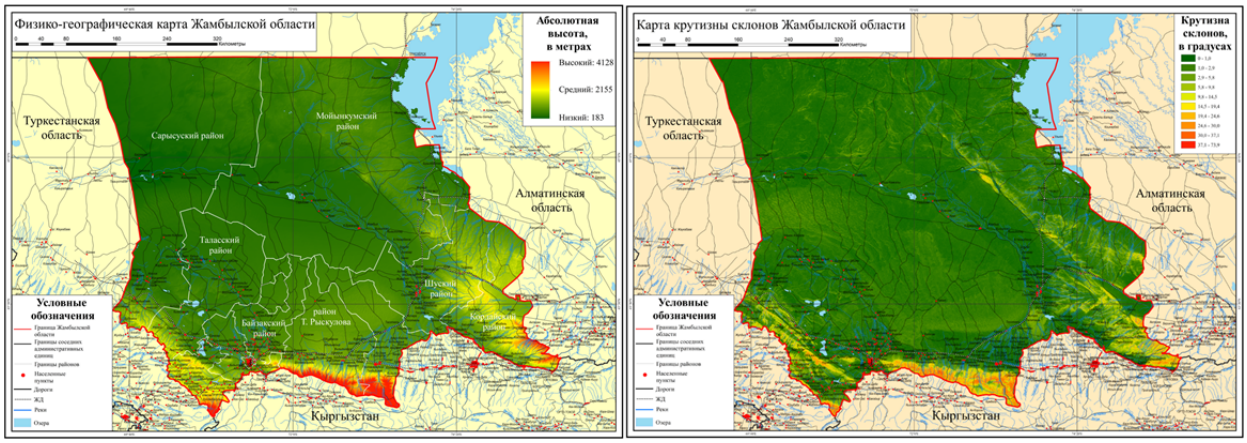
На основе картографических данных проведена обработка механического состава почв исследуемых областей. Слой механического состава почв представлен файлом с расширением .shp и охватывает территорию Жамбылской области.

ГИС-программное обеспечение и Web-GIS технологии. Обработка геопространственных данных выполнена в программном обеспечении ArcGIS Desktop 10.6 (инструменты Editor, Create Features, Cut polygons, Edit vertices, Extract, Overlay, Generalization, Join). Визуализация результатов исследования проведена в конструкторе Веб-ГИС приложений ArcGIS Web App Builder (WAB). Взаимодействие с интуитивно понятным интерфейсом позволяет создавать и запускать ГИС-приложения без написания кода. WAB настроен в виде GUI (Graphical user interface), где присутствуют виджеты, темы, способ отображения (двухмерные и трехмерные), базовые и настраиваемые карты. Также система оснащена кросс-платформенной функциональностью с использованием ArcGIS API для JavaScript и HTML 5. Портал для ArcGIS позволяет пользователям обмениваться геопространственными данными и приложениями, обеспечивая их безопасность, также имеется компонент корпоративной платформы, который помогает создавать сервисы обработки данных и управлять ими [20].

Методика проведения гидромодульного районирования орошаемых земель и расчета оптимальных способов орошения с помощью ГИС-технологий. Гидромодульное районирование выполнено на основе физико-географических (рисунок 4, *а*, *б*, *в*), гидрогеолого-меллиоративных, почвенно-меллиоративных (см. рисунок 4, *г*), агроклиматических (см. рисунок 4, *д*, *ж*) и водохозяйственных мероприятий.

В гидрогеолого-меллиоративном районировании учитывался уровень грунтовых вод и его влияние на меллиоративное состояние орошаемых земель. Данные дифференцируются по уровню залегания грунтовых вод на автоморфные (более 3 м), полугидроморфные (2-3 м) и гидроморфные (1-2 м и менее) [12]. Определение почвенно-меллиоративного районирования выполнено с помощью геопространственного слоя почвенных данных. Основами для методики и готовых векторных файлов были выбраны результаты исследования Kyrgyzbay and Kakimzhanov [13, 14].

Агроклиматическое районирование выполняется на основе определения суммы активных температур, гидротермического коэффициента (ГТК Селянинова) и суммы атмосферных осадков за период вегетации [12]. Водохозяйственное районирование проведено путем разделения на водо-



а *б*

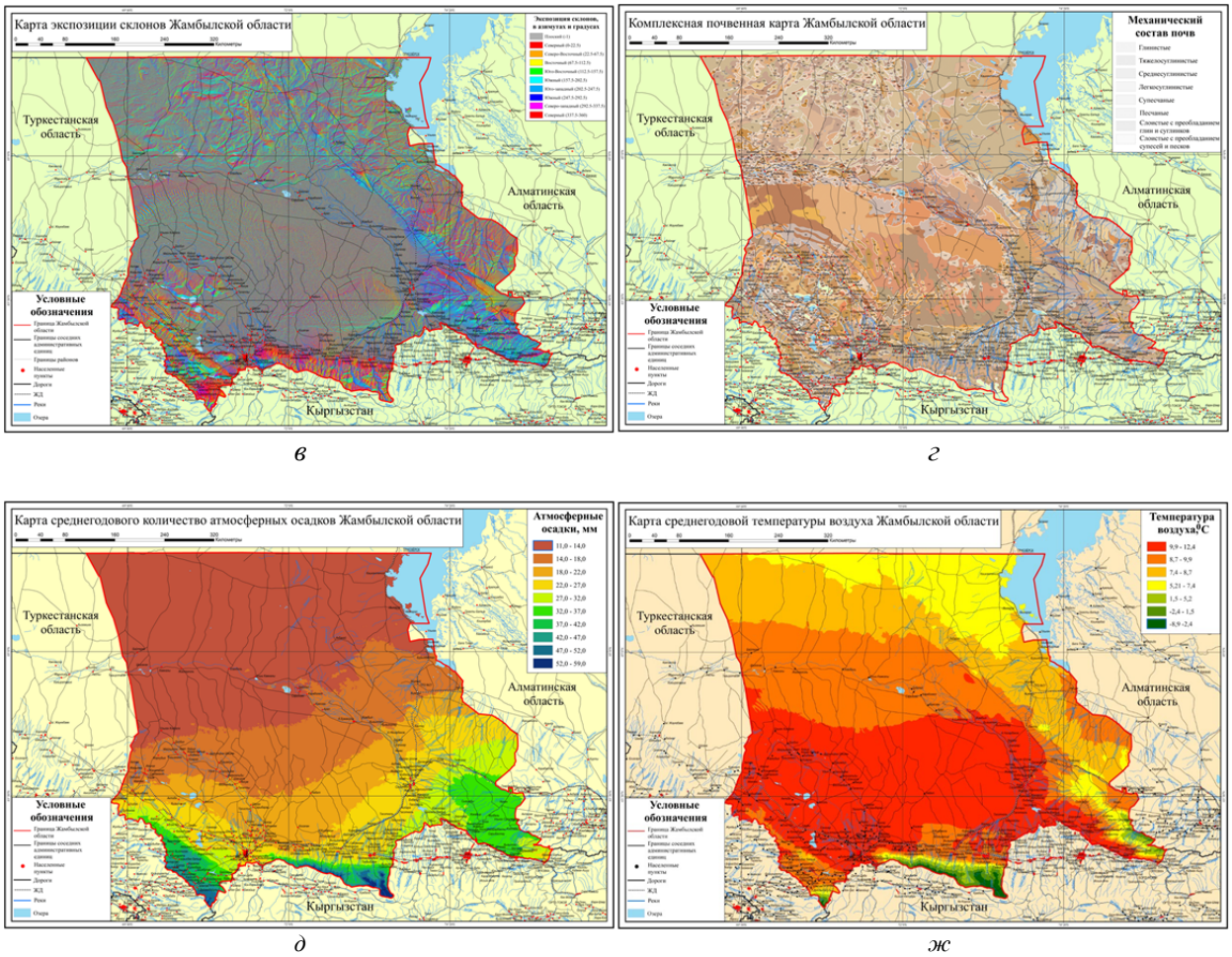


Рисунок 4 – Физико-географические (*а, б* и *в*), почвенные (*г*) и климатические (*д, ж*) данные

Figure 4 – Physical and geographical (*a, b* and *c*), soil (*d*) and climatic (*e, f*) data

сборные бассейны рек и гидрологических характеристок Балхаш-Алакольского водохозяйственного бассейна. В бассейне главными гидрографическими артериями являются реки Иле и Каратал [13].

Гидромодульное районирование орошаемых земель проведено с учетом перечисленных показателей. Первым этапом исследования являлось группирование орошаемых земель по уровню грунтовых вод (автоморфные, полугидроморфные и гидроморфные). На втором этапе в рамках каждой группы выполнено разделение по мощности и механическому составу почв на 9 гидромодульных районов [12].

Результаты. Результаты исследования представляют собой районирование орошаемых земель на гидромодульные районы с учетом механического состава почв и уровня грунтовых вод. С целью иллюстрации результатов исследования созданы карта гидромодульного районирования с рекомендованными способами орошения (рисунок 5), а также Веб-ГИС приложение для интеграции в среду Веб.

Проведение гидромодульного районирования орошаемых земель. Орошаемые земли на территориях областей были разделены на 9 (I-IX) гидромодульных районов по административным районам. В таблице указана информация о площади (га), уклоне местности (градус), механическом составе почв, водосборному бассейну, сумме активных температур (^{0}C) и количестве атмосферных осадков (мм) за период вегетации и гидротермическом коэффициенте (ГТК) каждого гидромодульного района (см. таблицу).

Представленная таблица отражает результаты гидромодульного районирования орошаемых земель Жамбылской области и демонстрирует пространственную дифференциацию природно-



Рисунок 5 – Гидромодульное районирование Жамбылской области

Figure 5 – Hydromodular zoning of Zhambyl region

климатических и почвенных условий, определяющих параметры водопотребления. Ее структура включает распределение территории по гидромодульным районам (I–IX) с указанием административной принадлежности, площадей орошаемых земель, уклонов поверхности, механического состава почв, водосборных бассейнов, а также ключевых агроклиматических показателей – суммы активных температур, количества осадков и гидротермического коэффициента. Такой набор показателей позволяет комплексно оценить условия формирования оросительных норм и выявить факторы, влияющие на потребность в водных ресурсах.

Анализ распределения территорий по гидромодульным районам показывает выраженную неравномерность освоения орошаемых земель. Наибольшая площадь сосредоточена в V районе, который играет ведущую роль в сельскохозяйственном использовании территории, тогда как минимальные площади характерны для VII района. Значительные массивы также приурочены ко II, VIII и IX районам, что свидетельствует о концентрации ирригационного земледелия в определённых зонах, обусловленной как природными условиями, так и историей хозяйственного освоения.

Различия в потребностях в орошении определяются сочетанием климатических параметров и почвенных характеристик. В районах с низкими значениями гидротермического коэффициента и недостаточным количеством осадков наблюдается повышенная потребность в оросительной воде, тогда как более увлажнённые территории характеризуются меньшей зависимостью от искусственного орошения. Существенное влияние оказывает механический состав почв: тяжелые и глинистые почвы обладают высокой влагоёмкостью и обеспечивают более длительное удержание влаги, в то время как легкие супесчаные и песчаные почвы требуют более частых поливов из-за быстрого дренирования. Таким образом, водопотребление сельскохозяйственных культур варьируется как по природно-климатическим зонам, так и по типам почв.

Показатели площадей орошаемых земель по рекомендованным способам орошения
в границах гидромодульных районов Жамбылской области

Irrigated Land Area Indicators by Recommended Irrigation Methods within the Hydromodule Zones of the Zhambyl Region

Гидро-мо-дуль-ный район	Админи-стративное деление	Пло-щадь, га	Уклон, град.	Механи-ческий состав	Водосборный бассейн	Сумма активных темпе-ратур, ^{0}C	Сумма осад-ков, мм	ГТК
I	Жамбылский, Жуалин-ский, Кордайский и Меркенский районы	36 383,9	0,7-5,2	Глинистые	Реки Талас, Шу, Асы, Терис, Курагаты, Караконыс, Шыгыс Жинишке	3649-4217	104-223	0,2-0,6
II	Байзакский, Жамбыл-ский, Жуалинский и Меркенский районы, район Т.Рыскулова	38 835,8	0,4-7,2	Песчаные, слоистые, среднесу-глинистые, супесчаные	Реки Асы, Талас, Шу, Терис, Курагаты, Карабатыр	3962-4179	135-220	0,3-0,5
III	Жамбылский, Кордайский и Меркенский районы	22 392,3	0,6-21,3	Среднесу-глинистые, тяжелосу-глинистые	Реки Асы, Талас, Шу, Терис, Курагаты, Карасу, Караконыс, Карабатыр, Акалатас	3558-4219	103-234	0,2-0,6
IV	Байзакский, Жамбыл-ский, Таласский и Шуйский районы	20 836,8	0,5-3,1	Глинистые, супесчаные	реки Асы, Талас, Шу	3994-4321	72-165	0,1-0,4
V	Байзакский, Жамбыл-ский, Кордайский, Меркенский и Шуйский районы, район Т.Рыскулова	155 981,5	0,2-9,1	Легкосу-глинистые, среднесу-глинистые, тяжелосу-глинистые	Реки Асы, Талас, Шу, Акалатас, Аксу, Батыс Жинишке, Киши-Кемин, Киши Алмалы, Курагаты, Кызылсай, Майбулак, Орикты, Ыргайты	3455-4313	74-249	0,1-0,7
VI	Байзакский, Жамбыл-ский, Меркенский. Мойынкумский и Шуйский районы	35 204,8	0,3-2,8	Глинистые, тяжелосу-глинистые	Реки Асы, Талас, Шу, Карабатыр, Курагаты, Шатырколь	3961-4306	77-228	0,1-0,5
VII	Байзакский, Жамбыл-ский, Мойынкумский. Таласский и Шуйский районы	5 694,6	0,8-2,4	Глинистые, песчаные, супесчаные	Реки Асы, Талас, Шу	4040-4234	104-170	0,2-0,4
VIII	Байзакский, Жамбыл-ский, Кордайский. Мойынкумский и Шуйский районы	65 614	0.1-4.1	Легкосу-глинистые, среднесу-глинистые	Реки Асы, Талас, Шу	3581-4285	85-231	0,1-0,6
IX	Байзакский, Жамбыл-ский, Кордайский. Мойынкумский и Шуйский районы	54 525	0,1-3,4	Тяжелосу-глинистые, среднесу-глинистые	Реки Талас, Шу	3600-4302	78-229	0,1-0,6

Закономерности изменения гидромодуля по территории области свидетельствуют о переходе от относительно более благоприятных по увлажнению предгорных и северных районов к более засушливым равнинным и пустынным зонам. В первых наблюдаются более высокие значения осадков и гидротермического коэффициента, тогда как во вторых – их снижение, сопровождающееся ростом зависимости от искусственного орошения. В восточных и центральных районах прослеживается значительная вариабельность условий, обусловленная сочетанием различных типов почв и неоднородностью климатических показателей.

С точки зрения водообеспеченности выделяются зоны с относительно благоприятным естественным увлажнением, где потребность в орошении умеренная, и зоны с выраженным дефицитом влаги, где орошение является критически необходимым фактором сельскохозяйственного производства. Наиболее вододефицитные территории характеризуются сочетанием низких значений гидротермического коэффициента, высоких температур и значительных площадей орошаемых земель, что усиливает нагрузку на водные ресурсы.

В целом представленные данные подтверждают необходимость дифференцированного подхода к управлению водными ресурсами в Жамбылской области. Рациональное использование воды должно основываться на учёте природно-климатических условий и почвенных особенностей каждого гидромодульного района, включая внедрение водосберегающих технологий в наиболее засушливых зонах и оптимизацию режимов полива в более обеспеченных влагой районах. Такой подход позволит повысить эффективность ирригационного земледелия и снизить нагрузку на ограниченные водные ресурсы региона.

Визуализация результатов в WAB. Результаты исследования продемонстрированы на рисунке 6. В приложении WAB присутствуют режимы редактирования и просмотра. В редактируемом режиме система позволяет добавить виджет, редактировать основную карту, вносить изменения в дизайн и тему карты. Режим просмотра выполняет функцию визуализации конечного вида интерактивной карты.

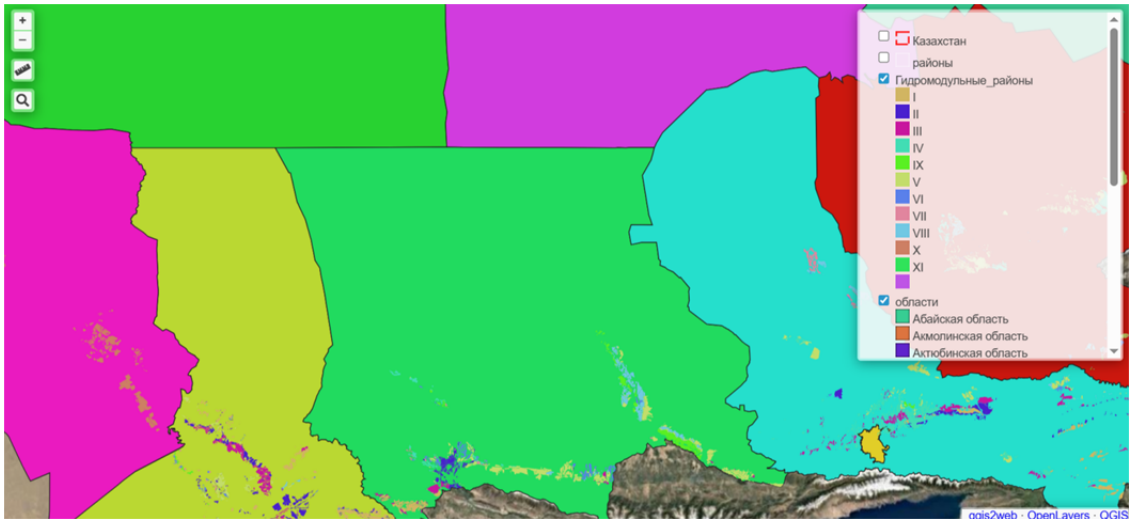


Рисунок 6 – Интерактивная карта гидромодульных районов

Figure 6 – Interactive map of hydromodule areas

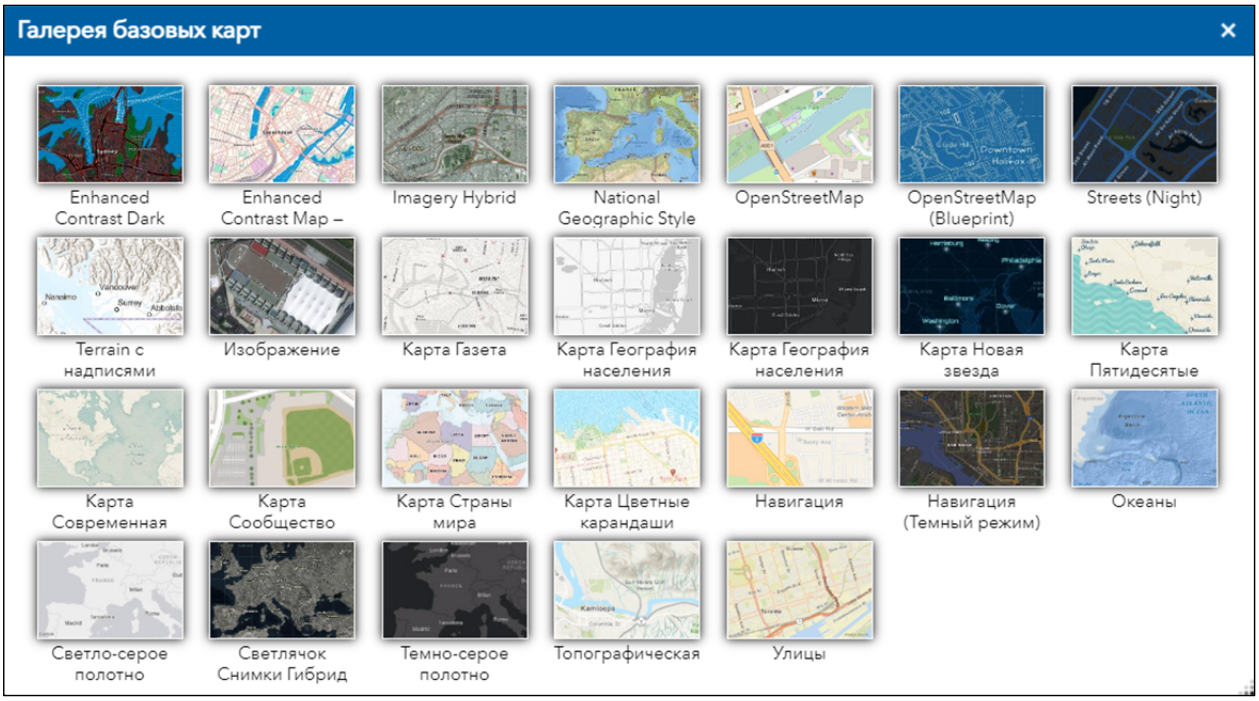


Рисунок 7 – Коллекция базовых карт

Figure 7 – Collection of base maps

В разработанной системе также присутствуют наименование интерактивной карты, логотип, кнопки зумирования (+/-), возврата на домашний экстент карты, определения местоположения пользователя, измеритель линейных и полигональных объектов (линейные и площадные), график анализа цифровых полей, базовые карты (рисунок 7), легенда, отображающая условные обозначения карты, и карта гидромодульных районов с понятным интерфейсом взаимодействия.

На рисунке 8 показан процесс взаимодействия пользователя с интерактивной картой. Представленные гидромодульные районы РК включают следующие атрибутивные данные: область, район, наименование гидромодульных районов (I-IX), площадь (в га), тип и механический состав почв, бассейн, орошаемый массив, высота (в метрах), уклон (в градусах), сумма активных температур (в ^{0}C), сумма осадков (в мм) и гидротермический коэффициент (ГТК). При переходе от мелкого к крупному масштабу полигональный слой гидромодульных районов заменяется на отдельные поля орошаемого земледелия с отдельными атрибутивными данными.

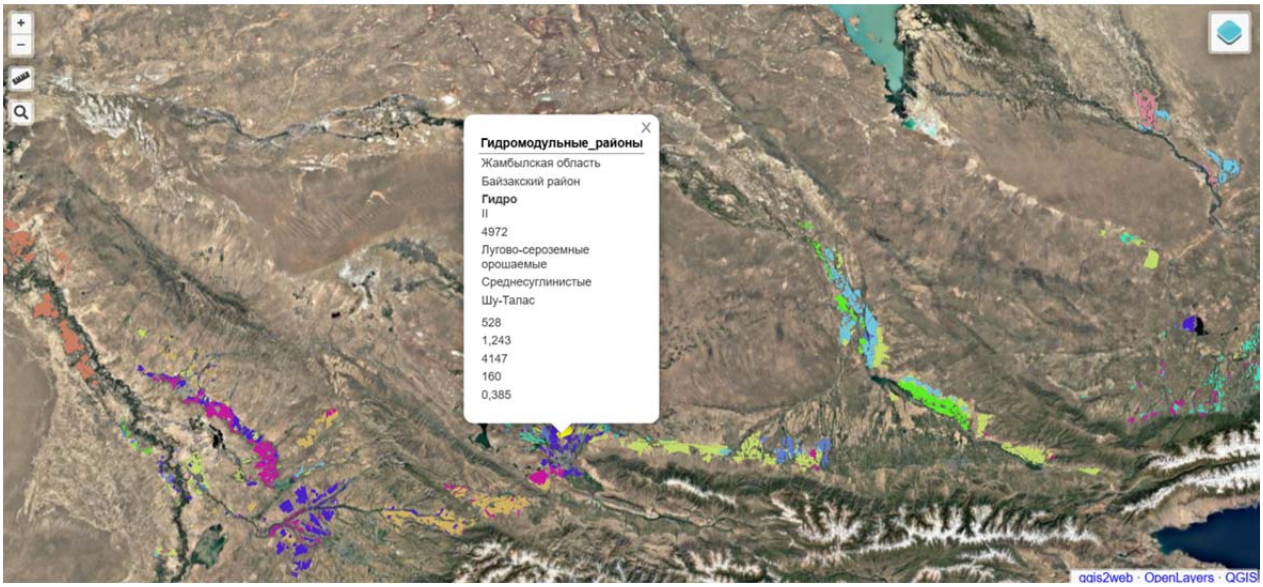


Рисунок 8 – Отображение атрибутивной информации гидромодульного района с дополнительными данными

Figure 8 – Display of the attribute information of the hydromodule area with additional data

Обсуждение. Разработанное гидромодульное районирование орошаемых земель Жамбылской области в целом соответствует целям и задачам, сформулированным во «введении», связанным с необходимостью рационального использования водных ресурсов в условиях их ограниченности и возрастающей нагрузки со стороны сельского хозяйства. Применение ГИС-технологий, дистанционного зондирования и интеграции разнородных данных позволило получить детализированную картину пространственной дифференциации условий орошения [14], что свидетельствует о достижении поставленной цели – выделения гидромодульных районов как основы для оптимизации водопотребления. Полученные результаты демонстрируют практическую реализуемость подхода, ранее апробированного в других регионах Центральной Азии, и подтверждают его применимость для условий Жамбылской области.

Методический подход настоящего исследования соответствует современным исследованиям по гидромодульному районированию орошаемых земель с применением ГИС-технологий. К примеру, в исследованиях Бухарской области гидромодульное районирование было проведено с учетом механического состава почв и уровня грунтовых вод [21], а в исследовании Чимбайского района Каракалпакстана основными показателями выступили тип и механический состав почв, уровень грунтовых вод и условия орошения [22]. В Ферганской долине традиционное гидромодульное районирование также основано на механическом составе, мощности почвенных слоев и глубине грунтовых вод [23]. В отличие от указанных подходов в настоящем исследовании гидромодульное районирование Жамбылской области выполнено с использованием более широкого комплекса факторов, включающего механический состав почв, гидрогеологические условия, уклон

поверхности, ГТК, сумму активных температур и атмосферных осадков, что позволяет учитывать одновременно почвенно-мелиоративную, рельефную и агроклиматическую неоднородность территории.

Выделение девяти гидромодульных районов отражает сложную структуру природно-климатических условий региона, формирование которых обусловлено сочетанием орографических особенностей, распределения атмосферных осадков и температурного режима. Более увлажнённые предгорные зоны характеризуются сравнительно благоприятным гидротермическим режимом, тогда как равнинные и пустынные территории отличаются выраженной аридностью [3, 4]. Эти различия предопределяют формирование зон с различной степенью водообеспеченности, что полностью согласуется с концепцией гидромодульного районирования, основанной на учёте природной влагообеспеченности и потенциальной потребности в орошении.

Существенное влияние на величины оросительных норм оказывают почвенные условия, что подтверждается выявленной дифференциацией механического состава почв по районам. Почвы тяжёлого механического состава, обладающие высокой влагоёмкостью, способствуют более равномерному распределению влаги и позволяют снижать частоту поливов, тогда как лёгкие почвы с высокой фильтрационной способностью требуют более интенсивного водоснабжения. В совокупности с климатическими показателями это формирует пространственные различия в водопотреблении сельскохозяйственных культур, что подтверждает многокомпонентный характер формирования гидромодуля.

Полученные результаты в целом согласуются с научными представлениями о закономерностях водопотребления в условиях аридных и полуаридных территорий, изложенными в работах по гидромодульному районированию и методикам ФАО [1, 9]. Как и в исследованиях, проведённых в Ферганской долине и южных регионах Казахстана, выявлена зависимость водопотребления от гидротермического коэффициента, структуры почв и агроклиматических параметров. Вместе с тем для Жамбылской области характерна более выраженная вариабельность условий внутри отдельных районов, что может быть связано с разнообразием рельефа и мозаичностью почвенного покрова.

Выявленные закономерности распределения водопотребления по территории области демонстрируют увеличение потребности в орошении по мере снижения естественного увлажнения и роста температурного режима. При этом значительные площади орошаемых земель сосредоточены именно в зонах с повышенным дефицитом влаги, что усиливает нагрузку на водные ресурсы и требует более эффективного управления ими. Такая ситуация отражает как природные ограничения, так и особенности хозяйственного освоения территории, где развитие ирригационного земледелия зачастую происходило в наиболее доступных для водоснабжения, но не всегда наиболее благоприятных по природным условиям зонах.

Практическая значимость полученных результатов заключается в возможности их использования для совершенствования систем орошения и повышения эффективности водопользования. Гидромодульное районирование позволяет обосновать внедрение дифференцированных режимов полива, применение водосберегающих технологий и адаптацию структуры посевных площадей к природным условиям. Кроме того, разработанная Веб-ГИС платформа обеспечивает удобный инструмент для визуализации и анализа данных, что расширяет возможности принятия управленческих решений и цифровизации водного хозяйства [20].

Вместе с тем результаты исследования имеют ряд ограничений. Использование обобщённых климатических и почвенных данных может приводить к сглаживанию локальных особенностей, особенно на уровне отдельных полей. Кроме того, не в полной мере учтено влияние уровня грунтовых вод, агротехнических приёмов и конкретных сельскохозяйственных культур, что может оказывать существенное влияние на фактические оросительные нормы. Масштаб исследования, охватывающий крупные территории, также ограничивает точность детализированных рекомендаций для локального уровня.

Кроме того, исследования должны быть дополнены полевой верификацией выделенных гидромодульных районов путем проведения наземных экспедиционных обследований, включающих уточнение почвенных и гидрологических характеристик, рельефа и фактических условий орошения. Полученные полевые данные позволят оценить достоверность выделенных границ ГМР и повысить точность расчетных оросительных норм на локальном уровне.

Проведённое гидромодульное районирование подтверждает эффективность как инструмента научного обоснования рационального водопользования и позволяет выявить ключевые факторы, определяющие пространственную дифференциацию водопотребления. Полученные результаты создают основу для дальнейшего уточнения методов оценки оросительных норм и разработки адаптивных систем управления водными ресурсами в условиях нарастающего дефицита воды.

Заключение. Таким образом, проведен комплекс работ по исследованию гидромодульного районирования Жамбылской области и последующему группированию единиц с рекомендованными способами орошения по 9 административным районам области. В результате все орошаемые земли исследуемых областей площадью более 400 000 га земли разделены на 9 гидромодульных районов с учетом информации о климатических, гидрографических, почвенных и геоморфологических данных и на 3 способа орошения (полив по бороздам, полив дождеванием и капельное орошение) с учетом уклона местности для предотвращения ирригационной эрозии. На основе ГИС-технологий и ДЗЗ были разработаны картографические материалы (карта гидромодульного районирования Жамбылской области с оптимальными способами орошения), описывающие результаты проведенного пространственного анализа. Данные и методы, приведенные при гидромодульном районировании, являются частью и продолжением предыдущих научных работ. Веб-ГИС приложение разработано для визуализации геопространственных данных с интерфейсом взаимодействия. Интерактивная карта включает виджеты и карту-основу с гидромодульными районами и орошаемыми полями, где пользователю предоставлена комплексная информация о состоянии выбранного поля или гидромодульного района. В последующем планируются проведение моделирования изменений климата и водного баланса и их влияния на орошение, а также работы, связанные с применением библиотек и фреймворков языков программирования при разработке геопортала сельскохозяйственного назначения.

Финансирование. Исследование выполнено в рамках грантового финансирования Комитета науки Министерства науки и высшего образования Республики Казахстан «Разработка гидромодуля Жамбылской области с помощью новых методов дистанционного зондирования земли» (ИРН AP26104801).

ЛИТЕРАТУРА

[1] Food and Agriculture Organization of the United Nations. The State of Food and Agriculture 2023. – Rome: FAO, 2023.

[2] Luque-Sánchez Á., Díaz-Cabrera J. M., Perez Galvín A., Gámez-Granados J. C., Castillejo-González I. L. Optimizing water management: identifying strategies to enhance irrigation efficiency under drought conditions // Journal of Environmental Management. – 2025. – DOI: https://doi.org/10.1016/j.jenvman.2025.127439

[3] Mabhaudhi T., Dirwai T. L., Taguta C., Kanda E. K., Nhamo L., Cofie O. A systematic review of irrigation development and agricultural water management in Mali // Enhancing water and food security through improved agricultural water productivity / Ed. by T. Mabhaudhi, V. G. P. Chimonyo, A. Senzanje, P. P. Chivenge. – Singapore: Springer, 2025. – DOI: https://doi.org/10.1007/978-981-96-1848-4_14

[4] Singh A. K., Shreya, Khatoon S., Chaturvedi D. K., Choudhury U., Yadav A. K., Sharma G. A comprehensive review of recent advances in intelligent controller development for smart irrigation systems // Discover Computing. – 2025. – Vol. 28. – Art. 239. – DOI: https://doi.org/10.1007/s10791-025-09762-4

[5] Adeyemi O., Grove I., Peets S., Norton T. Advanced monitoring and management systems for improving sustainability in precision irrigation // Sustainability. – 2017. – Vol. 9. – P. 353. – DOI: https://doi.org/10.3390/su9030353

[6] Jamroen C., Komkum P., Fongkerd C., Krongpha W. An intelligent irrigation scheduling system using low-cost wireless sensor network toward sustainable and precision agriculture // IEEE Access. – 2020. – Vol. 8. – P. 172756-172769. https://doi.org/10.1109/ACCESS.2020.3025590

[7] Nawandar N. K., Satpute V. R. IoT based low cost and intelligent module for smart irrigation system // Computers and Electronics in Agriculture. – 2019. – Vol. 162. – P. 979-990. https://doi.org/10.1016/j.compag.2019.05.027

[8] Umutoni L., Samadi V. Application of machine learning approaches in supporting irrigation decision making: A review // Agricultural Water Management. – 2024. – Vol. 294. Article 108710. https://doi.org/10.1016/j.agwat.2024.108710

[9] Стулина Г. В., Солодкий Г. Ф. Использование усовершенствованной методики ФАО для оценки водопотребления сельскохозяйственных культур в процессе орошения в Центральной Азии. – Ташкент, 2020.

[10] Балгабеков К. Б. Гидромодульное районирование и защита почв от ирригационной эрозии на юго-востоке Казахстана. – 1999.

[11 В Казахстане площадь орошаемых земель до 2030 года будет доведена до 3 млн га – С. Брекешев // Официальный информационный ресурс Премьер-Министра Республики Казахстан. – URL: https://primeminister.kz/ru/news/v-kazahstane-do-2030-ploshchad-oroshaemyh-zemel-budet-dovedena-do-3-mln-ga-s-brekeshev-5996 (дата обращения 03.03.2026).

[12] Оспанбаев Ж., Капашев А. Х., Жапаев Р. К., Майбасова А. С., Сембаева А. С., Досжанова А. С., Кунипияева Г. Т. Методика расчета режимов орошения сельскохозяйственных культур в разрезе регионов. – Алматы: Асыл кітап, 2023.

[13] Кыргызбай К. Агроклиматическое районирование Алматинской области с использованием ГИС-технологий // Доклады НАН РК. Серия физико-математическая. – 2022. – № 2. – С. 76-91. – DOI: https://doi.org/10.32014/2022.2518-1726.131

[14] Кыргызбай К., Какимжанов Е. Создание геобазы данных Алматинской области на основе ГИС-технологий // Доклады НАН РК. Серия физико-математическая. – 2023. – № 1. – С. 136–153. https://doi.org/10.32014/2023.2518-1726.174

[15] Карта размещения регулярных и лиманных орошаемых площадей (с учетом перспективы до 2020 г.). – Масштаб 1:3 000 000. – Алматы: Казгипроводхоз, 2019.

[16] Gascon F., Bouzinac C., Thépaut O., Jung M., Francesconi B., Louis J., Lonjou V., Lafrance B., Massera S., Gaudel-Vacaresse A. Copernicus Sentinel-2A calibration and products validation status // Remote Sensing. – 2017. – Vol. 9, No. 6. – P. 584, https://doi.org/10.3390/rs9060584

[17] Farr T. G., et al. The Shuttle Radar Topography Mission // Reviews of Geophysics. – 2007. – Vol. 45. – RG2004, https://doi.org/10.1029/2005RG000183

[18] OpenStreetMap contributors. OpenStreetMap [Data set]. OpenStreetMap Foundation. URL: https://www.openstreetmap.org/ (date of access 2026-03-16)

[19] OpenStreetMap contributors. OpenStreetMap [Data set]. OpenStreetMap Foundation. Available from: https://www.openstreetmap.org/#map=5/48.71/66.90 (date of access 2026-03-17)

[20] Bhatia T., Singh H., Litoria P., Pateriya B. Web GIS development using Portal for ArcGIS, ArcGIS Server and Web AppBuilder for ArcGIS // JCST. – 2019. – Vol. 10, No. 1.

[21] Khamidov M., Inamov A., Islamov U., Mamatkulov Z., Inamov B. (2023). Determination of irrigation regimes based on geospatial technologies in water scarcity areas // E3S Web of Conferences, 386, 02001. https://doi.org/10.1051/e3sconf/202338602001

[22] Abdurakhmonov S., Bekanov K., Embergenov N., Eshnazarov D. (2023). Hydrological modeling of agricultural lands on the basis of GIS technologies (On the example of the Chimbay district of the Republic of Karakalpakstan) // E3S Web of Conferences, 386, 02004. https://doi.org/10.1051/e3sconf/202338602004

[23] Dukhovny V., Mukhamedjanov Sh., Mukhamedjanov A., Nangia V. (1/12/2015). Improving Water Use Efficiency Through Innovative Technologies in Irrigation and Agriculture in the Fergana Valley. – Tashkent, Uzbekistan: Scientific-Information Center of the Interstate Coordination Water Commission of the Central Asia (SIC-ICWC).

REFERENCES

[1] Food and Agriculture Organization of the United Nations. The State of Food and Agriculture 2023. Rome: FAO, 2023.

[2] Luque-Sánchez Á., Díaz-Cabrera J. M., Perez Galvín A., Gámez-Granados J. C., Castillejo-González I. L. Optimizing water management: identifying strategies to enhance irrigation efficiency under drought conditions // Journal of Environmental Management. 2025. DOI: https://doi.org/10.1016/j.jenvman.2025.127439

[3] Mabhaudhi T., Dirwai T. L., Taguta C., Kanda E. K., Nhamo L., Cofie O. A systematic review of irrigation development and agricultural water management in Mali // Enhancing water and food security through improved agricultural water productivity / Ed. by T. Mabhaudhi, V. G. P. Chimonyo, A. Senzanje, P. P. Chivenge. Singapore: Springer, 2025. DOI: https://doi.org/10.1007/978-981-96-1848-4_14

[4] Singh A. K., Shreya, Khatoon S., Chaturvedi D. K., Choudhury U., Yadav A. K., Sharma G. A comprehensive review of recent advances in intelligent controller development for smart irrigation systems // Discover Computing. 2025. Vol. 28. Art. 239. DOI: https://doi.org/10.1007/s10791-025-09762-4

[5] Adeyemi O., Grove I., Peets S., Norton T. Advanced monitoring and management systems for improving sustainability in precision irrigation // Sustainability. 2017. Vol. 9. P. 353. – DOI: https://doi.org/10.3390/su9030353

[6] Jamroen C., Komkum P., Fongkerd C., Krongpha W. An intelligent irrigation scheduling system using low-cost wireless sensor network toward sustainable and precision agriculture // IEEE Access. 2020. Vol. 8. P. 172756-172769. https://doi.org/10.1109/ACCESS.2020.3025590

[7] Nawandar N. K., Satpute V. R. IoT based low cost and intelligent module for smart irrigation system // Computers and Electronics in Agriculture. 2019. Vol. 162. P. 979-990. https://doi.org/10.1016/j.compag.2019.05.027

[8] Umutoni L., Samadi V. Application of machine learning approaches in supporting irrigation decision making: A review // Agricultural Water Management. 2024. Vol. 294. Article 108710. https://doi.org/10.1016/j.agwat.2024.108710

[9] Stulina G. V., Solodky G. F. The use of the improved FAO methodology for assessing the water consumption of agricultural crops in the irrigation process in Central Asia. Tashkent, 2020 (in Russ.).

[10] Balgabekov K. B. Hydromodule zoning and soil protection from irrigation erosion in the south-east of Kazakhstan. 1999 (in Russ.).

[11] In Kazakhstan, the area of irrigated land will be increased to 3 million hectares by 2030. – S. Brekeshev // Official information resource of the Prime Minister of the Republic of Kazakhstan. URL: https://primeminister.kz/ru/news/v-kazahstane-do-2030-ploshchad-oroshaemyh-zemel-budet-dovedena-do-3-mln-ga-s-brekeshev-5996 (date of access 2026-03-03) (in Russ.).

[12] Ospanbaev Zh., Kapashev A. H., Zhapaev R. K., Majbasova A. S., Sembaeva A. S., Doszhanova A. S., Kunypiyaeva G. T. Methodology for calculating irrigation regimes of agricultural crops in the context of regions. Almaty: Asyl kitap, 2023 (in Russ.).

[13] Kyrgyzbay K. Agro-climatic zoning of Almaty region using GIS technologies // Reports of the NAS RK. Physico-Mathematical Series. 2022. No. 2. P. 76-91. DOI: https://doi.org/10.32014/2022.2518-1726.131 (in Russ.).

[14] Kyrgyzbay K., Kakimzhanov E. Creation of a geodatabase of Almaty region based on GIS technologies // Reports of the NAS RK. Physico-Mathematical Series. 2023. No. 1. P. 136–153, https://doi.org/10.32014/2023.2518-1726.174 (in Russ.).

[15] Map of the placement of regular and estuarine irrigation areas (taking into account the prospects up to 2020). Scale 1:3 000 000. Almaty: Kazgiprovodkhoz, 2019 (in Russ.).

[16] Gascon F., Bouzinac C., Thépaut O., Jung M., Francesconi B., Louis J., Lonjou V., Lafrance B., Massera S., Gaudel-Vacaresse A. Copernicus Sentinel-2A calibration and products validation status // Remote Sensing. 2017. Vol. 9, No. 6. P. 584, https://doi.org/10.3390/rs9060584

[17] Farr T. G., et al. The Shuttle Radar Topography Mission // Reviews of Geophysics. 2007. Vol. 45. RG2004, https://doi.org/10.1029/2005RG000183

[18] OpenStreetMap contributors. OpenStreetMap [Data set]. OpenStreetMap Foundation. URL: https://www.openstreetmap.org/ (date of access 2026-03-16)

[19] OpenStreetMap contributors. OpenStreetMap [Data set]. OpenStreetMap Foundation. Available from: https://www.openstreetmap.org/#map=5/48.71/66.90 (date of access 2026-03-17)

[20] Bhatia T., Singh H., Litoria P., Pateriya B. Web GIS development using Portal for ArcGIS, ArcGIS Server and Web AppBuilder for ArcGIS // JCST. 2019. Vol. 10, No. 1.

[21] Khamidov M., Inamov A., Islamov U., Mamatkulov Z., Inamov B. (2023). Determination of irrigation regimes based on geospatial technologies in water scarcity areas // E3S Web of Conferences, 386. 02001. https://doi.org/10.1051/e3sconf/202338602001

[22] Abdurakhmonov S., Bekanov K., Embergenov N., Eshnazarov D. (2023). Hydrological modeling of agricultural lands on the basis of GIS technologies (On the example of the Chimbay district of the Republic of Karakalpakstan) // E3S Web of Conferences, 386, 02004. https://doi.org/10.1051/e3sconf/202338602004

[23] Dukhovny V., Mukhamedjanov Sh., Mukhamedjanov A., Nangia V. (1/12/2015). Improving Water Use Efficiency Through Innovative Technologies in Irrigation and Agriculture in the Fergana Valley. Tashkent, Uzbekistan: Scientific-Information Center of the Interstate Coordination Water Commission of the Central Asia (SIC-ICWC).

Қ. Т. Қырғызбай[*1], Н. Э. Бекмухамедов[2], А. С. Егизбаева[3], К. В. Константинова[4]

[1] [*]PhD, жетекші ғылыми қызметкер, доцент-зерттеуші (Ұлттық ғарыштық зерттеулер мен технологиялар орталығы, Әл-Фараби атындағы ҚазҰУ, Алматы, Қазақстан; ***kyrgyzbay.kudaibergen@gmail.com***)

[2] А.-ш. ғ. к., ЖҚЗ департаментінің директоры (Ұлттық ғарыштық зерттеулер мен технологиялар орталығы, Алматы, Қазақстан; *nurlan1964@yandex.ru*)

[3] PhD, Ауыл шаруашылығы өндірісін ғарыштық мониторингтеу зертханасының меңгерушісі (Ұлттық ғарыштық зерттеулер мен технологиялар орталығы, Алматы, Қазақстан; *sin.asset@gmail.com*)

[4] PhD, аға ғылыми қызметкер (Ұлттық ғарыштық зерттеулер мен технологиялар орталығы, Алматы, Қазақстан; *k.konstantinova@spaceres.kz*)

ВЕБ-ГАЖ ТЕХНОЛОГИЯЛАРЫНЫҢ НЕГІЗІНДЕ АУЫЛШАРУАШЫЛЫҚ ЖЕРЛЕРІН ГИДРОМОДУЛЬДІ АУДАНДАСТЫРУ

Аннотация. Ауыл шаруашылығы жерлерін суару халық санының өсуі және қолайсыз табиғи-климаттық факторлардың күшеюі жағдайында азық-түлік қауіпсіздігін қамтамасыз етуде маңызды рөл атқарады. Су ресурстарын ұтымды пайдалану климаттық, топырақтық және гидрогеологиялық жағдайларды кешенді түрде ескеруді талап етеді. Қуаң Орталық Азия жағдайында жер және су ресурстарын тиімді пайдалану мақсатында суармалы ауыл шаруашылығы жерлерін жіктеудің қолайлы әдістерінің бірі – гидромодульдік аудандастыру. Зерттеу Жамбыл облысының ауыл шаруашылығы жерлерін Веб-ГАЖ технологиялары мен қашықтан зондтау әдістерін қолдана отырып, гидромодульдік аудандастыруға арналған. Мақсаты: облыстың әкімшілік бөлінісі шегінде климаттық, гидрографиялық, топырақ жағдайлары мен жер асты суларының деңгейін ескере отырып, суармалы алқаптарды гидромодульдік аудандар бойынша оңтайлы бөлу. Зерттеуде суармалы жерлердің шекараларын анықтау үшін Sentinel-2A/2B ғарыштық суреттері, абсолюттік биіктік пен жер бедерінің еңістігін талдау үшін SRTM деректері, ал әкімшілік шекараларды анықтау үшін OpenStreetMap деректері пайдаланылды. Геокеңістіктік талдау ArcGIS бағдарламасында жүргізілді. Нәтижесінде гидромодульдік аудандардың кеңістіктік орналасуы мен аудандары анықталып, веб-картографиялық материалдар әзірленді. Нәтижелер ArcGIS WebApp Builder арқылы Веб-ГАЖ ортасына интеграцияланып, климаттың өзгеруі мен су ресурстарын ұтымды пайдалануға қатысты одан әрі зерттеулерге негіз бола алады.

Түйін сөздер: гидромодульді аудандастыру, кеңістіктік талдау, ГАЖ, ЖҚЗ, суармалы жерлер, Веб-ГАЖ.

K. T. Kyrgyzbay[*1], N. E. Bekmukhamedov[2], A. S. Yegizbayeva[3], K. V. Konstantinova[4]

[1] *PhD, leading researcher, associate professor-researcher (National Center of Space Research and Technology, Al-Farabi Kazakh National University, Almaty, Kazakhstan; ***kyrgyzbay.kudaibergen@gmail.com***)
[2] Candidate of agricultural sciences, Director of the Earth Observation Department (National Center of Space Research and Technology, Almaty, Kazakhstan; *nurlan1964@yandex.ru*)
[3] PhD, Head of the Laboratory for Space Monitoring of Agricultural Production (National Center of Space Research and Technology, Almaty, Kazakhstan; *sin.asset@gmail.com*)
[4] PhD, senior researcher (National Center of Space Research and Technology, Almaty, Kazakhstan; *k.konstantinova@spaceres.kz*)

HYDROMODULE ZONING OF AGRICULTURAL LANDS USING WEB-GIS TECHNOLOGIES

Abstract. Irrigation of agricultural lands plays a key role in ensuring food security amid population growth and increasing adverse climatic and environmental factors. Rational water resource management requires comprehensive consideration of climatic, soil, and hydrogeological conditions. In arid Central Asia, hydromodule zoning is one of the appropriate methods for classifying irrigated agricultural lands to ensure efficient use of land and water resources. This study focuses on hydromodule zoning of agricultural lands in the Zhambyl Region using Web GIS technologies and remote sensing methods. The objective is to optimally allocate irrigated fields among hydromodule zones within the administrative boundaries of the region, considering climatic, hydrographic, and soil conditions, as well as groundwater levels. The study used Sentinel-2A/2B satellite imagery to identify irrigated land boundaries, SRTM data to analyze elevation and terrain slope, and OpenStreetMap data to determine administrative boundaries. Geospatial analysis was conducted using ArcGIS. As a result, the spatial distribution and areas of hydromodule zones were determined, and web-based cartographic materials were developed. The results were integrated into a Web GIS environment using ArcGIS Web AppBuilder and can serve as a basis for further research on climate change and the sustainable management of water resources.

Keywords: hydromodule zoning, spatial analysis, GIS, remote sensing, irrigated lands, Web-GIS.