

Динара Мирзабековна Калманова* – педагогика ғылымдарының кандидаты, Л.Н. Гумилев атындағы Еуразия ұлттық университетінің «Ғарыштық техника және технологиялар» кафедрасының доцент м.а., Астана, Қазақстан; e-mail: dinara_kalmanova@mail.ru. ORCID: <https://orcid.org/0000-0001-5977-8448>.

Өмірзақ Көптілеуұлы Әбдірашев – PhD, Л.Н. Гумилев атындағы Еуразия ұлттық университетінің «Ғарыштық техника және технологиялар» кафедрасының доцент м.а., Астана, Қазақстан; e-mail: omeke_92@mail.ru. ORCID: <https://orcid.org/0000-0001-7621-5444>.

Сведения об авторах

Ильдар Гусманович Курмашев – PhD, ассоциированный профессор, Северо-Казахстанский университет имени Манаша Козыбаева, г. Петропавловск, Казахстан; e-mail: ikurmashev@ku.edu.kz. ORCID: <https://orcid.org/0000-0001-9872-7483>.

Акнур Коптилеуовна Косаякова – Северо-Казахстанский университет имени Манаша Козыбаева, г. Петропавловск, Казахстан; e-mail: aknur_ast_enu@mail.ru. ORCID: <https://orcid.org/0000-0004-5435-5509>.

Динара Мирзабековна Калманова* – кандидат педагогических наук, и.о. доцент кафедры «Космическая техника и технологии», Евразийский национальный университет им. Л.Н. Гумилева, Астана, Казахстан; e-mail: dinara_kalmanova@mail.ru. ORCID: <https://orcid.org/0000-0001-5977-8448>.

Омирзақ Коптилеуович Абдірашев – PhD, и.о. доцент кафедры «Космическая техника и технологии», Евразийский национальный университет им. Л.Н. Гумилева, Астана, Казахстан; e-mail: omeke_92@mail.ru. ORCID: <https://orcid.org/0000-0001-7621-5444>.

Information about the authors

Ildar Gusmanovich Kurmashev – PhD, Associate Professor, Manash Kozybayev North Kazakhstan university, Kazakhstan; e-mail: ikurmashev@ku.edu.kz. ORCID: <https://orcid.org/0000-0001-9872-7483>.

Aknur Koptileuovna Kossayakova – Manash Kozybayev North Kazakhstan university, Kazakhstan; e-mail: aknur_ast_enu@mail.ru. ORCID: <https://orcid.org/0000-0004-5435-5509>.

Dinara Mirzabekovna Kalmanova* – Candidate of Pedagogical Sciences and Acting Associate Professor of the Department of «Space Engineering and Technology» at the Eurasian National University named after L.N. Gumilyov, Astana, Kazakhstan; e-mail: dinara_kalmanova@mail.ru. ORCID: <https://orcid.org/0000-0001-5977-8448>.

Omirzak Koptileuovich Abdirashev – PhD, Acting Associate Professor of the Department of «Space Engineering and Technology» at the Eurasian National University named after L.N. Gumilyov, Astana, Kazakhstan; e-mail: omeke_92@mail.ru. ORCID: <https://orcid.org/0000-0001-7621-5444>.

Редакцияға енуі 11.06.2025

Өңдеуден кейін түсуі 15.08.2025

Жариялауға қабылданды 18.08.2025

[https://doi.org/10.53360/2788-7995-2025-3\(19\)-12](https://doi.org/10.53360/2788-7995-2025-3(19)-12)

MPHTI: 20.23.27



А.А. Бондарович¹, А. Мәуліт^{2*}, И.А. Очеретько³, Ж.З. Жантасова³

¹Алтайский государственный университет,
Российская Федерация, Алтайский край, г. Барнаул, пр. Ленина, 61

²Шәкәрім университеті,
071412, Республика Казахстан, г. Семей, ул. Глинки, 20 А

³Восточно-Казахстанский университет им. С.Аманжолова,
Республика Казахстан, г. Усть-Каменогорск, ул. Казахстан 55.

*e-mail: maulit.almas@gmail.com

ТЕХНОЛОГИИ ДИСТАНЦИОННОГО ЗОНДИРОВАНИЯ В ОЦЕНКЕ ПОЧВЕННОЙ ВЛАЖНОСТИ НА ТЕРРИТОРИИ, ПОДВЕРЖЕННОЙ ПАВОДКАМ: ОБЗОР

Аннотация: Почвенная влажность является одним из ключевых гидрологических параметров, напрямую влияющих на формирование поверхностного стока, паводков и оползней. Особенно важную роль она играет в периоды весеннего снеготаяния и экстремальных метеоосадков, когда насыщенность почвы влагой достигает критических уровней. В условиях глобального изменения климата и участившихся экстремальных погодных явлений возрастает потребность в оперативном и точном мониторинге влажности почвы, особенно для регионов, подверженных паводкам, таких как Восточно-Казахстанская область. В статье представлен

комплексный обзор современных методов дистанционного зондирования (ДЗЗ), применяемых для оценки почвенной влаги с целью повышения эффективности прогнозирования паводков. Рассматриваются возможности пассивных радиометров (например, SMAP, SMOS), активных радарных сенсоров (Sentinel-1, RADARSAT) и оптических систем (Sentinel-2, Landsat-8) в извлечении информации о влажностных характеристиках верхнего слоя почвы. Кроме того, освещены локальные методы с использованием мультиспектральных камер, установленных на беспилотных летательных аппаратах (БПЛА), что особенно актуально при необходимости локального мониторинга с высоким разрешением. Проведен сравнительный анализ дистанционных и наземных методов измерения почвенной влаги. Особое внимание уделено алгоритмическим подходам обработки спутниковых данных: спектральным и радиометрическим индексам (NDVI, NDMI, LST), методам машинного обучения и нейросетевым архитектурам для улучшения оценки пространственно-временных вариаций почвенной влаги. Рассматриваются также программные решения и платформы, такие как Google Earth Engine, SNAP, ArcGIS и QGIS, обеспечивающие доступ и автоматизированную обработку больших объемов спутниковых данных. Таким образом, обзор демонстрирует значительный потенциал интеграции ДЗЗ в гидрологические модели для формирования эффективной системы раннего предупреждения о паводках и устойчивого водохозяйственного планирования на региональном уровне.

Ключевые слова: почвенная влажность, дистанционное зондирование, паводки, спутниковый мониторинг, машинное обучение, нейросети, мультиспектральные данные.

1. Введение

Наводнения являются одними из наиболее разрушительных стихийных бедствий, приводя к значительным экономическим потерям и угрозе для жизни людей. Особенно актуальна проблема паводков в условиях изменения климата, которое приводит к учащению экстремальных осадков и быстрому таянию снега. Важным фактором формирования паводков является именно почвенная влага. [1]. При высокой начальной влажности грунта уменьшается инфильтрация, что переводит часть осадков и талых вод в поверхностный сток что увеличивает риск паводка. [2]. Ряд европейских авторов отмечают, что физические параметры почвы могут в значительной степени контролировать масштаб паводка из-за нелинейного характера реакции стока на осадки [3, 4]. Авторы работы [5] изучая более чем 400 естественных водосборов вдоль климатического градиента по всей Европе выявили, что дефицит почвенной влаги сокращает сток сильнее и быстрее, чем она сокращает эвапотранспирацию. В крупнейшем водосборе КНР реки Янцзы (Yangtze River) из-за роста температуры в зимний период таяние снега оказывает незначительное влияние на формирование наводнений и наводнения обычно происходят летом при совпадении насыщения влагой почв и экстремальными осадками [6, 7]. При этом очевидно, что в различных климатических и литологических положениях ведущую роль занимают различные драйверы [8]. Так, изучив 124 642 наводнений по всему миру авторы отметили, что совместный вклад осадков и почвенной влажности составляет наибольшую долю многофакторных наводнений, что подчеркивает предварительную роль измерения предшествующей влажности почвы в развитии наводнений [9]. Авторы [10] среди ключевых проблем в сфере изучения влияния влажности почв на гидрологический сток выделили вопрос: как инновационные технологии (например, спутниковые и реанализа) могут быть использованы для количественной оценки гидрологических состояний и потоков в диапазоне пространственно-временных масштабов? Особую актуальность данные ДЗЗ и реанализа приобретают в регионах со слабым покрытием наземных инструментальных данных. Одним из таких регионов является Центральная Азия и особенно области с разнообразным рельефом – равнины и горы. Так, Восточно-Казахстанская область (ВКО) – охватывает юго-западную часть Алтайских гор, хребты Саур-Тарбагатай, Зайсанскую впадину и Прииртышскую равнину. Рельеф контрастен: пойма Иртыша – это высота ~150 м над уровнем моря, а высочайшая точка Катунского хребта – Белуха 4500 м над.ур. моря. Такой перепад высот обуславливает резко континентальный климат с холодной снежной зимой и обильным снегонакоплением в горах, что весной нередко приводит к паводкам и затоплению равнинных территорий. По данным региональной службы ЧС, к зонам высокого риска паводков отнесены Зайсанский, Тарбагатайский, Куршимский, Самарский, Алтайский, Уланский и Глубоковский районы. К территориям со средним риском паводков относятся Катон-Карагайский, Улкен Нарынский, Маркакольский районы и г. Риддер – преимущественно горные местности, где половодье менее масштабное, но возможны локальные сели и разливы рек.

Учитывая вышесказанное регион крайне нуждается в современных методах мониторинга различных факторов паводкового риска. Одним из таких факторов является влажность почвы, которая в данном контексте на региональном уровне слабо изученна и в первую очередь по причине дефицита наземных данных, которые в прогнозных задачах, как показывает мировая практика, возможно дополнить данными спутников и реанализа. Получение своевременной информации о почвенной влаге из различных источников (ДЗЗ, наземные инструментальные и реанализ) позволит лучше понимать пространственные закономерности распределения влажности почвы для повышения качества прогноза объемов весеннего стока и идентификации зон, наиболее уязвимых к паводку.

2. Методы

Для подготовки данной обзорной статьи применялся комплексный методологический подход, включающий систематический анализ научной литературы, библиографический обзор, геопространственный и технологический анализ. Были изучены научных публикаций за последние 15-20 лет, преимущественно из международных баз данных (Scopus, Web of Science, ScienceDirect, MDPI, IEEE Xplore). Основное внимание уделялось статьям, рассматривающим применение технологий дистанционного зондирования (ДЗЗ) для оценки почвенной влажности в контексте паводковых рисков. Особый акцент был сделан на исследованиях, касающихся паводкоопасных регионов, включая Восточно-Казахстанскую область. Использовался сравнительный анализ методов измерения влажности почвы – как традиционных наземных, так и дистанционных, с оценкой эффективности спутниковых, радарных и мультиспектральных сенсоров. Проведен обзор алгоритмов обработки ДЗЗ-данных, включая методы машинного обучения и нейросетей. В рамках анализа программных решений рассмотрены современные ГИС-платформы и облачные вычислительные среды, включая Google Earth Engine, SNAP, ArcGIS и QGIS. Подход обеспечил всесторонний охват темы, обоснование актуальности и выделение перспективных направлений применения ДЗЗ для оценки влажности почвы и прогнозирования паводков.

3. Результаты и обсуждение

3.1. Обзор основных источников данных о влажности почв

В целом методы мониторинга влажности почвы можно разделить на две большие группы: контактные (наземные) и дистанционные (табл. 1). Контактные – подразумевают прямое измерение влагосодержания на месте, тогда как дистанционные позволяют оценивать влагу удалённо (со спутников или беспилотников), охватывая большие площади [11]. Ниже приведен обзор основных методов измерения и их особенностей применения (табл. 1).

Таблица 1 – Методы мониторинга влажности почв

№	Метод измерения	Описание	Ссылка
1	Гравиметрический метод	Образец почвы высушивается в лаборатории при определенной температуре и массовая влажность вычисляется как разница между массой сырого и сухого образца, отнесенная к массе сухой почвы	[12, 13]
2	Датчики влажности почвы	Приборы, измеряющие влажность через связанные физические параметры. Наиболее распространены диэлектрические методы: TDR (Time Domain Reflectometry, метод временной области) и FDR (Frequency Domain, частотный метод).	[14,15]
3	Нейтронные влагомеры	Портативные приборы, излучающие нейтроны и по скорости их замедления, оценивающие содержание водорода (воды) в почве.	[16]
4	Тензиометры	Приборы для измерения <i>матричного потенциала</i> почвенной влаги, т.е. силы удерживания воды грунтом.	[12]
5	Нейтронный зондирования космическими лучами (CRNS – Cosmic-Ray Neutron Sensing)	Основан на регистрации потоков нейтронов, рождающихся при взаимодействии космических лучей с ядрами атомов в почве. Водород (содержащийся преимущественно в воде) эффективно поглощает нейтроны, поэтому по снижению интенсивности космических нейтронов у поверхности можно судить о влажности почвы в слое порядка 0–50 см глубиной на территорию радиусом ~100–300 м вокруг детектора	[17]
6	Инфракрасные термовлагомеры и георадар (GPR)	Наземная радиолокация, способная качественно выявлять контрасты влажности на глубине.	[18]

Инструментальные измерения влажности почвы на локальном уровне наиболее точны, но, их организация имеет ряд ограничений [19-21]. Среди наземных наблюдений за влажностью почвы выделяют: (а) трудоемкие гравиметрические измерения, (b) экспресс-измерения с помощью ручных устройств, (с) автоматические станции наблюдения, которые подходят для непрерывного наблюдения на разных глубинах [22-24]. Крупнейшей в мире платформой для сбора и публикации результатов измерений влажности почвы с более чем 2800 датчиков по всему является Международная сеть по влажности почвы (International Soil Moisture Network, далее ISMN) [25]. Значительных успехов с начала 2000-х годов в создании наземных измерительных сетей по извлечению температуры и влажности почвы на различных глубинах в труднодоступных районах достигли китайские исследователи [26]. На платформе ISMN также опубликованы данные по влажности почв по территории Казахстана, которые были получены в результате декадных гравиметрических измерений для целей агрометеорологии еще во времена СССР, но это, во-первых, небольшое количество станций, где проводились измерения (например, в Восточно-Казахстанской области – это East-Kaza (194a) с рядом наблюдений 1987-1991), а во-вторых это короткие ряды (максимально конец 1970-конец 1990-х годов). Эти наблюдения продолжены и в настоящее время, но представляются только на коммерческой основе. Национальная мониторинговая сеть с применением автоматических измерительных станций по измерению влажности почв на территории Казахстана пока не сформирована. Существуют локальные сети, которые связаны с международными проектами [27].

По сравнению с наземными методами использование дистанционного зондирования позволяет получить непрерывный пространственный охват, но в основном длиннорядные наблюдения существуют только для поверхностной влажности почв до глубины 0-5 см. Ниже рассмотрены основные современные технологии ДЗЗ, применяемые для оценки влажности почвы в контексте паводков: спутниковые системы и сенсоры, беспилотные летательные аппараты, алгоритмы и индексы обработки данных, а также использование нейросетей и машинного обучения (рис. 1).

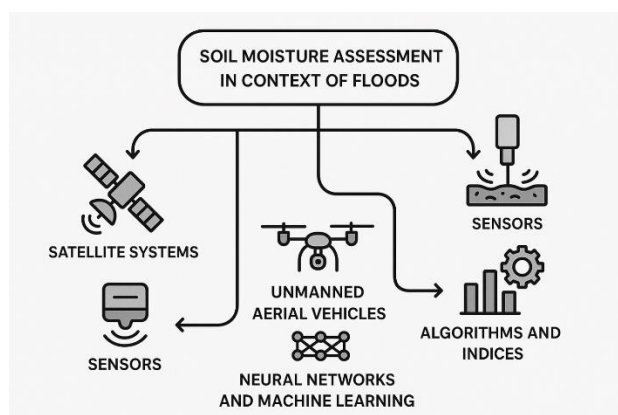


Рисунок 1 – Оценка влажности почвы при паводках: источники данных и методы обработки

Среди спутниковых приборов, связанных с обозначенной задачей, выделяют активные и пассивные СВЧ-радиометры, которые имеют различное пространственно-временное разрешение. Авторы [28] представили подробный обзор и хронологию с 1980-х космических радиометров (пассивное микроволновое излучение), скаттерометров (активное микроволновое излучение) и их комбинации, которые можно использовать для определения поверхностной влажности почвы в глобальном масштабе, в том числе и при оценке рисков наводнений. Подробный анализ возможностей использования данных влажности почв на основе ДЗЗ для гидрологии можно так же найти в работе [29]. Авторы довольно подробного обзора продуктов извлечения влажность почвы в глобальном масштабе [30], выделяют варианты получения данных о поверхностной влажности почв либо с помощью пассивных датчиков (например, SMMR, SSM/I, TMI, WindSat, AMSR-E, AMSR2, SMOS, SMAP) либо - активных датчиков (например, ERS и ASCAT).

Несмотря на существующие ограничения (слабое пространственное разрешение и проникающая способность волны на глубину) именно аппараты пассивного микроволнового

дистанционного зондирования обладают большим потенциалом для получения оценок слоя 0-5 см в региональном масштабе с хорошим временным охватом на ежедневной основе (до 2-х измерений в сутки). В первую очередь речь идет о микроволновом сканирующем радиометре Японского агентства аэрокосмических исследований (JAXA) AMSR-E (Advanced Microwave Scanning Radiometer for EOS) на спутнике AQUA (NASA) и микроволновом сканирующем радиометре AMSR-2 (Advanced Microwave Scanning Radiometer 2) на спутнике GCOM-W1 (JAXA) [31, 32].

Активные микроволновые сенсоры (радары) на спутниках также широко используются для измерения влажности почв, преимущественно через обратное рассеяние от поверхности. Различают два типа: скаттерометры (низкого разрешения, но широкополосные датчики, предназначенные для глобального мониторинга) и синтезированные апертурные радары (SAR, более высокого разрешения). С 2007 г. на метеоспутниках METOP действуют скаттерометры ASCAT (ESA/EUMETSAT), непрерывно наблюдающие влажность почвы по всему земному шару. На их базе создан оперативный продукт – индекс влажности почвы (SMI), используемый в европейской системе предупреждения засух и наводнений [33]. SAR-радиолокаторы, такие как Sentinel-1A/B (С-диапазон, ЕС, запуски 2014 и 2016 гг.), обеспечивают изображения с высоким пространственным разрешением (10-20 м) и могут применяться для оценки относительной влажности поверхностного слоя на локальном уровне. Sentinel-1 уже применялся для мониторинга экстремальной засухи и паводков – так, его данные ассимилируются в гидрологические модели, как упоминалось ранее, и улучшают расчет половодья [34]. Кроме того, радары Sentinel-1 широко используют для прямого картирования зон затопления во время паводков, поскольку микроволны проникают сквозь облачность и позволяют различать воду и сушу (методом пороговой классификации и индексов на основе коэрленса и поляризации).

Оптические и тепловые спутниковые сенсоры не измеряют влагу почвы напрямую, но дают ценные косвенные показатели. Например, мультиспектральные камеры (напр. спутники Landsat-8/9, Sentinel-2) регистрируют отражение света в видимом и инфракрасном диапазоне, что позволяет вычислять спектральные индексы влажности. В частности, NDWI (Normalized Difference Water Index) и NDMI (Normalized Difference Moisture Index) – комбинации отражения в ближнем ИК и видимом/среднем ИК диапазонах – используются для оценки содержания влаги в растительном покрове и выявления переувлажненных площадей [35]. Если территория покрыта растительностью, эти индексы дают информацию о влагозапасах растений и косвенно о влажности почвы в корнеобитаемом слое. Для открытых грунтов оптические данные фиксируют изменение цвета почвы при увлажнении: мокрый грунт темнеет, и его отражательная способность в видимом и ИК снижется. Таким образом, по уменьшению альбедо поверхности можно примерно судить об увлажнении. Однако практическое применение этого ограничения требует учета многих факторов (состав почвы, угол солнца, наличие корки). Гораздо надежнее оптические сенсоры служат для картографирования воды на поверхности – то есть определения, где почва уже перенасыщена и появилась свободная вода. С этой целью используется, например, нормализованный водный индекс MNDWI и другие модификации, выделяющие открытые водоемы на снимках Sentinel-2 [36]. Во время наводнений такие индексы помогают очертить границы затопления, хотя и зависят от облачности (оптические спутники не «видят» сквозь облака). Тепловые инфракрасные сенсоры (на Landsat, MODIS, и специальная миссия ECOSTRESS) измеряют температуру поверхности, которая связана с влажностью через испарение: влажная почва обычно холоднее сухой за счет испарительного охлаждения. На этом основаны методы термального инерциального индексирования (например, индекс температурно-вегетационного рассеяния TVDI), которые могут указывать на зоны сухости или влажности почвы, комбинируя данные LST (land surface temperature) и NDVI. В частности, метод OPTRAM (Optical Trapezoid Model) использует красный, ближний ИК и тепловой канал для оценки влажности верхнего слоя почвы на полях и показал работоспособность в исследованиях с использованием данных Landsat и Sentinel-2 [37]. Оптические и тепловые данные особенно ценны для высокого пространственного разрешения (десятки метров), позволяя рассмотреть мелкомасштабные вариации, недоступные микроволновым датчикам. Но их существенный недостаток – зависимость от погодных условий (прозрачности атмосферы) и от наличия солнечного освещения (для визуальных каналов).

Совмещение данных пассивных и активных микроволновых датчиков (например, метод такоразмеривания, когда грубая по разрешению карта SMOS/SMAP уточняется по текстуре снимка Sentinel-1) – перспективное направление, позволяющее получить влагометрию с высоким разрешением [38]. Также актуально объединение оптических и микроволновых оценок: оптика лучше различает мелкие пространственные детали и состояние растительности, а радиоданные дают физически обоснованную величину влажности. Спутниковые данные постоянно сверяются с наземными измерениями (сетью метеостанций, эксперименты типа SMAPVEX), благодаря чему их алгоритмы улучшаются. Развитие спутникового мониторинга продолжается – планируются новые миссии (например, совместный американо-индийский спутник NISAR с L-диапазонным радаром, запущенный в 2024 г.), которые еще больше повысят качество данных по влажности почвы.

Важно отметить, что на практике наиболее успешными оказываются комбинированные подходы. Например, создание стационарных сетей мониторинга почвенной влаги (с датчиками на разных глубинах) для калибровки и проверки данных дистанционного зондирования. Так, SMAP позволил извлекать влажность почвы не только поверхностного (3 см), но и корнеобитаемого слоя (50 см), как это продемонстрировано на примере водосборного бассейна реки Шаньдянь на территории автономных районов КНР Хэбэй и Внутренняя Монголия в масштабах 3, 9, 36, и 100 km², где для калибровки были использованы данные наблюдений in-situ: 34 станции, установленных с пространственным разрешением 100, 50 и 10 км, с датчиками Decagon 5TM (США) на глубинах 3, 5, 10, 20, 50 см [40]. В то же время для проведения региональных и локальных исследований больше подходят миссии Sentinel-1 и Sentinel-2. Так, в сельскохозяйственном регионе Саламанка Западной Испании была сделана попытка повысить точность оценки влажности почвы (0-5 см) в сельскохозяйственных районах. Для этой цели были использованы радиолокационные данные датчика Sentinel-1, а также оптические данные датчика Sentinel-2 с пространственной точностью 10 м, а для калибровки использовали данные полевых наблюдений, полученных на месте исследования с использованием датчиков TDR, входящих в ISMN [41].

В заключение рассмотрим существующие алгоритмы и методы анализа данных ДЗЗ для оценки влажности почвы. Современная обработка данных дистанционного зондирования (ДЗЗ) для оценки почвенной влажности базируется на двух подходах: Физико-эмпирические алгоритмы – используются для радиометров и радаров (SMAP, Sentinel-1) с применением моделей инверсии (τ - ω , Water Cloud Model), расчёта спектральных индексов (NDVI, NDWI, NDMI, TVDI, OPTRAM) и геостатистики.

Методы машинного обучения – включают нейросети и интеллектуальные алгоритмы, позволяющие выявлять сложные взаимосвязи между сигналами сенсоров и влагосодержанием почвы. Они обеспечивают высокую точность за счёт обучения на больших наборах данных (рис. 2, табл. 2).

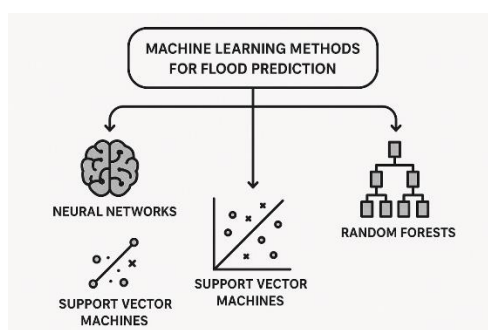


Рисунок 2 – Методы машинного обучения для прогноза паводков

Каждый метод имеет ограничения по пространственному охвату и разрешению, поэтому совмещение наземных измерений с данными спутников и моделей позволяет получить целостную картину. Современные системы предупреждения паводков стремятся учитывать данные разных масштабов: от точечной влажности грунта на гидрологических постах до распределенных полей влажности с гидрометеорологических радаров, спутников и БПЛА.

Таблица 2 – Примеры использования методов машинного обучения и нейросетей в оценке почвенной влажности

№	Подход	Тип алгоритма	Используемые данные	Применение	Преимущества
1	Прямая регрессия влажности	Нейросети (MLP, CNN)	Sentinel-1/2, SMAP, мультиспектр	Количественная оценка влажности	Высокая точность ($R^2 > 0.8$)
2	Классификация состояний почвы	Random Forest, SVM	NDVI, NDWI, SAR	“Сухая/влажная/затопленная” почва	Простота, высокая скорость обучения
3	Слияние данных	Data Fusion (CNN, RF)	Оптические и радарные снимки	Объединение данных с разных спутников	Повышение пространственного разрешения
4	Прогнозирование во времени	LSTM, GRU	Временные ряды: осадки, влага, сток	Прогноз влажности и паводков	Учет динамики, улучшение предсказаний

БПЛА (дроны) стремительно вошли в арсенал методов мониторинга состояния земель, включая оценку увлажнения почв. Например, Guan и соавт. (2023) выполнили съемку сельскохозяйственного поля беспилотником, оснащенным мультиспектральной (RGB+NIR+RedEdge) и тепловизионной камерами, и собрали одновременно ~100 проб влажности на разной глубине mdpi.com. Затем применили ряд алгоритмов машинного обучения (нейросетевые, метод опорных векторов и др.) для установления зависимости между спектрально-тепловыми показателями и измеренной влажностью почвы. Лучшие модели (например, на основе нейронной сети или Gaussian Process Regression) достигли средней ошибки около 4-5% по абсолютной влажности (в долях от полной насыщенности) [42].

Применение БПЛА имеет ограничения: небольшая площадь покрытия за вылет, зависимость от погоды и значительные трудозатраты при больших масштабах. Однако в контексте паводкоопасных территорий их можно использовать для мониторинга наиболее критических зон – например, плотин, береговых линий рек, склонов, где возможен оползень. В этих местах дроны помогут оценить преувлажнение грунтов перед паводком и принять точечные меры (укрепление дамбы, отвод воды). Таким образом, БПЛА не заменяют спутники, но дополняют их на местном уровне, обеспечивая сверхвысокое разрешение и гибкость наблюдений.

3.2 Обзор исследований по применению ДЗЗ для прогноза паводков

За последние десятилетия накоплен значительный научный материал по применению дистанционного зондирования для оценки влажности почвы и улучшения прогнозных моделей наводнений. Так, авторы [43], используя данные спутникового радиометра ASCAT, добились существенного улучшения прогнозов речного стока при паводках в экспериментальном бассейне в Италии. Авторы [44] в обзоре методов спутникового прогнозирования наводнений отмечают исследование, в котором данные Sentinel-1 о влажности поверхности были интегрированы в гидрологическую модель «Continuum» для средиземноморского бассейна. В результате ассимиляция этой информации существенно улучшила расчет паводочных пиков, особенно для случаев сильных ливней. Предварительная насыщенность почвы, полученная со спутника, позволила модели точнее предсказать формирование стремительных паводков. В Соединенных Штатах значительное внимание уделяется использованию данных специализированных миссий для мониторинга почвенной влаги. Спутник NASA SMAP (запущен в 2015 г.) предоставляет глобальные карты влажности верхнего слоя (~5 см) с разрешением порядка 9 км. Данные SMAP широко применяются для улучшения гидрологических прогнозов [45]. Через механизмы data assimilation (ассимиляции данных) спутниковая влажность вводится в оперативные модели осадко-стока, что приводит к более корректному расчету инфильтрации и стока. Например, в Китае проведена работа по внедрению данных SMAP и других спутников во влажностно-балансовую модель реки Ханьцзян. Авторы работы [46] показали, что ассимиляция спутниковых оценок влажности почвы повысила точность прогноза паводка на реке Сюнь, улучшив совпадение рассчитанных и наблюдаемых пиков расхода воды. Отдельно стоит отметить исследования по

использованию мультиспектральных и тепловых данных для косвенной оценки переувлажнения территории во время паводков. Оптические спутники (Landsat, Sentinel-2 и др.) не могут напрямую измерять влагу в почве, но широко применяются для картографирования зон затопления и выявления аномалий влажности по вегетационным индексам. Авторы [47] разработали глубокую нейросетевую модель, анализирующую совместно снимки Sentinel-1 (радар) и Sentinel-2 (оптика), для детектирования областей затопления. Их подход с использованием данных ИК-диапазона (для выделения воды и влажных почв с помощью модифицированных водных индексов) позволил повысить достоверность карт паводкового затопления. Это подтверждает глобальную тенденцию: современные методы ДЗЗ не ограничиваются одним типом данных, а комбинируют различные источники (радиолокационные, оптические, климатические) для всестороннего мониторинга паводков и факторов, им способствующих.

Мировая практика прогнозирования паводков с учетом влажности почв опирается на различные источники данных. Авторы [48] использовали австралийскую модель водного баланса (англ. Australian water balance model (AWBM) непрерывного стока-осадков для калибровки 45 водосборов в бассейне Мюррей-Дарлинг (Австралия) и обнаружили, что правильное моделирование влажности почвы предшествующего периода может значительно повысить точность моделирования. Авторы [49] анализируя экстремальные паводки в Австрии и на Крите с помощью пространственно - распределенной модели внезапного паводка Kamrus (состоит из процедуры снега, влажности почвы и маршрутизации потока), которая была откалибрована с применением данных ДЗЗ о поверхностном слое влажности почв разрешение 25 км (скаттерометр ERS-1) и показаниями осадкомеров выявили, что первоначальное воздействие влажности почвы на реакцию на внезапные паводки, вероятно, зависит от масштаба события, а не от климата или региона. Более того, было обнаружено, что водосборный бассейн демонстрирует в Австрии более нелинейную зависимость между предшествующей влажностью почвы и максимальным расходом воды, чем водосборный бассейн Крита, что объясняется различиями в типе почвы. Авторы [50] проанализировали сроки наводнений рек в Европе в период с 1960 по 2010 годы с использованием данных 4262 гидропостов и обнаружили явный сдвиг в сроках зимних паводков в Западной Европе из-за более ранних максимумов влажности почвы. Авторы [51] показали, что большинство ежегодных пиковых паводков в Европе вызваны не крупными осадками, а взаимным совпадением экстремальных осадков с условиями таяния снега или насыщения влагой почвы. Анализ данных 4-х гидропостов с 1955-2016 в бассейне второй по величине реки Индии Годавари с применением модели переменной инфильтрации показал, что в более 80% случаев экстремальных осадков, вызывающих наводнения, накладывались на фактор предшествующей влажности почвы [52]. Авторы [53] используя данные в 1378 гидрологических водосборах по всей Европе за период 1980-2010 гг. продемонстрировали тесную статистическую ковариационную связь между влажностью почвы и аномалиями стока для различных европейских климатических режимов. Используя основанный на данных сравнительный подход с несколькими водосборными бассейнами и различными наборами данных, они выявили доминирующую ковариацию первого порядка между влажностью почвы и стоком в месячном масштабе. Авторы [54] изучили тенденции стока рек Австралии, используя продукты AWAP – ежедневные данные о количестве осадков с координатной сеткой 0,05° (5 км), AWRA-L – модели суточного распределенного водного баланса, а также данные in-situ о влажности почв в 1 м и обнаружили, что в тропических регионах время паводков тесно связано со временем выпадения осадков и годового максимума влажности почвы, а на юге Австралии время паводка больше коррелирует с максимальным уровнем влажности почвы, чем с максимальным количеством осадков. Наводнения со стремительным подъемом уровня воды в летне-осенний период в 2021, в 2023 и в 2024 натолкнули на изучение пространственно-временных закономерностей на основе Event Coincidence Analysis (ECA) (Анализ совпадений событий) между насыщенной влагой почвой и экстремальными осадками для дальнейшей визуализации сезонного характера такой зависимости в различных типах климата Европы, а в последствии идентификации ежегодных наводнений, возникающих после того, как такие совпадения влага почвы и осадки уже имели место быть. При этом исследователи столкнулись с проблемой, которая характерна для всех регионов мира, а именно – не существует набора инструментальных данных наблюдений за влажностью почвы

в континентальном масштабе с последовательным и однородным пространственным и временным охватом. Поэтому были использованы альтернативные данные, полученные на основе модели GLEAM [55].

Особый интерес представляют горные водосборные бассейны, которые дают преобладающий вклад в питание крупнейших водных артерий мира. Интерес представляет применение Китайской системы гидрологического моделирования ливневых паводков (англ. China Flash flood-Hydrological Modeling System (CNFF-HMS) для определения пороговых значений осадков и предшествующей влажности почв и их влияния на наводнение в трех горных водосборных бассейнах на юге Китая. Результаты показали, что как предшествующая влажность почв, так и временная схема осадков значительно влияли на изменения порогового значения осадков. Пороговое значение осадков снижалось на 8-38 и 0-42% по мере увеличения насыщения почвы с 0,20 до 0,50 и с 0,20 до 0,80 соответственно [56]. Применяя физически обоснованную распределенную гидрологическую модель (интегрированная гидрологическая модель, Integrated Hydrology Model, InHM) к теплому влажному горному водосбору реке Шоуси (площадь водосбора 560 км²) на юго-западе Китая (warm humid mountainous catchment in Southwest China, the Shouxi River.), а также применяя коэффициент насыщения почвы (англ. soil saturation ratio) группа ученых выявила, что увеличение периода возврата осадков и предшествующего коэффициента насыщения почвы значительно увеличило пиковый сток и сократило время пика. Кроме того, с увеличением площади водосбора относительная важность осадков имела тенденцию к снижению, в то время как относительный вклад коэффициента насыщения почвы имеет тенденцию к увеличению [57]. Близкие результаты получены по крупнейшему водосбору Китая реке КНР реки Янцзы (Yangtze River), для которого провели анализ ежегодных наводнений с более чем 200 гидрологических станций за два периода с 1970 по 1990 год и с 2007 по 2016 год в среднем и нижнем бассейне реки Янцзы, а также применяя индекс топографической влажности и потенциальную эвапотранспирацию выявили, что доминирующий фактор в возникновении наводнений смещается с осадков на предшествующую влажность почвы с увеличением площади водосбора. При этом авторы отметили, что полученные выводы могут быть полезны для оценки потенциального риска наводнений в труднодоступных горных регионах, но с оговоркой чтобы применить наши выводы к холодным водоразделам со значительным воздействием снега, необходимо включить компонент таяния снега [58]. Практически во всех перечисленных примерах данные о влажности почв были смоделированы, поскольку и выше уже упоминалось, что многие исследователи сталкиваются с проблемой отсутствия инструментальных данных о влажности почвы в масштабе водосбора. Интересен опыт оценки возможных паводков на основе спутниковых, модельных и инструментальных данных об эквиваленте снеговой воды (SWE), влажности почвы (SM) и аномалии запаса подземных вод (GWSA) для анализа их пространственно-временных изменений в сезонном замерзании-оттаивании в трансграничный бассейн реки Тюмень [59]. В этом исследовании [59], для измерения влажности почвы был создан пункт мониторинга влажности почвы на глубинах 10 см и 20 см: данные с июня 2019 по июнь 2021 года, датчики влажности (EC-5, METER Inc., США) и сохранялась в виде 30-минутного среднего значения с помощью регистратора данных (ZENO 3200, Coastal, США). Для оценки эквивалента снеговой воды (Snow water equivalent) были использованы наборы данных AMSR-E/Aqua Level-3 и AMSR-E/AMSR2 Unified Level-3 по глобальной 25-километровой сетке SWE EASE, выпущенные Национальным центром данных по снегу и льду НАСА (<https://nsidc.org/home>). Метеорологические данные были получены с применением глобальной системы ассимиляции данных о суше (GLDAS), которая предоставляет широкий спектр высококачественных глобальных приземных метеорологических данных, параметрических карт и результатов моделей суши. Данные о температуре (T) и осадках (P) для этого исследования были извлечены из ежемесячных данных о воздействии из Noah Land Surface Model (NLSM) 0,25° (<https://ldas.gsfc.nasa.gov/gldas/forcing-data>). Данных о поверхностной влажности почвы были получены с использованием продукта основе дистанционного зондирования (Remote Sensing-based global Surface Soil Moisture dataset, RSSSM), который создан на основе калибровку данных и слияние данных 11 общепризнанных микроволновых продуктов дистанционного зондирования влажности почвы с 2003 года с помощью нейронной сети, при этом данные влажности почвы Soil Moisture Active Passive (SMAP) применялись в качестве основной цели обучения [61, 62].

Для локальных исследований на уровне небольших водосборов, которые требуют более высокого пространственного разрешения, как и в нашем случае, больший интерес представляет алгоритм определения влажности почвы с разрешением 1 км, использующий данные спутникового радара Sentinel-1 [63]. Разработана прямая модель, направленная на количественную оценку связи между влажностью почвы и коэффициентами обратного рассеяния радарных данных. В дальнейшем влажность почвы определялась как значение, минимизирующее разность между коэффициентом обратного рассеяния, полученным с помощью прямой модели, и наблюдениями, полученными с Sentinel-1. Проверка показала, что предложенный алгоритм воспроизводит влажность почвы с несмещенной среднеквадратичной разницей (unbiased root mean squared difference, ubRMSD) 0,077 м³/м³. Созданы глобальные карты влажности почвы за период 2016-2022 гг. с разрешением 1 км, с частотой наблюдений 3-6 суток для Европы и 6-12 суток для других регионов. В нашей работе был использован данный алгоритм.

В государствах постсоветского пространства также ведутся работы по внедрению дистанционных методов контроля почвенной влажности и предупреждению паводков. В Российской Федерации проблема оперативной оценки влажности почв рассматривается как актуальная, учитывая обширность территории и разнообразие климатических условий. Задача определения влажности грунта спутниковыми методами остается сложной, однако развивается с появлением новых данных и алгоритмов. Российские ученые используют как зарубежные спутниковые данные (например, от SMOS, SMAP, Sentinel), так и собственные разработки.

Следует упомянуть, что в странах СНГ исторически сильны традиции гидрометеорологического мониторинга, поэтому подход часто комбинированный: ГИС и дистанционное зондирование интегрируются с наземными наблюдениями. В российских работах делается акцент на создание геоинформационных систем риска наводнений, где исходные данные включают спутниковые оценки влажности почвы, данные о снегозапасах и осадках [64]. Например, для бассейнов рек Южной Сибири и Дальнего Востока предпринимаются попытки учитывать данные спутниковых микроволновых радиометров о влажности поверхности при сезонном прогнозе половодья. Также рассматриваются возможности спутниковой гравиметрии (миссия GRACE) для оценки изменения запасов воды в почве и грунтовых вод, что может указывать на общее увлажнение территории [65].

В Казахстане применение технологий дистанционного зондирования для отслеживания влажности почвы и связанных гидрологических рисков находится в стадии активного развития. Учитывая большую площадь страны и неравномерность сети наземных наблюдений, спутниковый мониторинг обеспечивает уникальную возможность получать данные по труднодоступным территориям в реальном времени. В последние годы реализованы пилотные проекты по оценке почвенной влаги из космоса. Так, специалисты АО «Қазақстан Ғарыш Сапары» совместно с учеными провели исследования в северном Казахстане, ключевом аграрном регионе страны. Кабжанова и соавт. (2024) продемонстрировали, что сочетание спутниковых снимков и полевых измерений позволяет эффективно картировать предпосевные запасы продуктивной влаги в почве [66]. В их работе использовались мультиспектральные данные (в том числе расчёт индексов NDVI, NDWI, NDMI) в комбинации с данными точечных измерений влагомерами. Калибровка спутниковых индексов по результатам проб грунта повысила точность количественной оценки влажности [66]. Итогом стала серия карт распределения влаги по районам Северо-Казахстанской области, которые выявили значительную пространственную неоднородность – от переувлажненных низин до пересушенных участков. Этот опыт ценен не только для сельского хозяйства (планирование ирригации, борьба с засухой), но и с точки зрения водного баланса: недостаточное увлажнение почвы зимой и весной уменьшает объем половодья, а избыточная влажность – наоборот, повышает риск скоротечного стока при талом периоде.

Прямых исследований, посвященных именно паводкам в Восточном Казахстане с применением ДЗЗ, пока немного, но предпосылки для их проведения есть. Казгидромет и подразделения МЧС РК проявляют интерес к спутниковому мониторингу снежного покрова и влажности почв как индикаторов возможного паводка. В некоторых работах отмечалась возможность использования данных казахстанского спутника KazEOSat и европейских Sentinel для наблюдения за динамикой снежного покрова в горах Алтая и влажностью почвы в

поймах рек Иртыш, Уба, Улба. Существующие научные результаты в мире и первые исследования в самой Республике Казахстан показывают, что применение дистанционного зондирования открывает новые горизонты в понимании паводковых процессов. В частности, оно помогает получать непрерывные поля влажности почвы, интегрировать их в гидрологические модели и тем самым повышать точность прогнозирования наводнений и масштабов половодья.

Вывод

Почвенная влажность играет ключевую роль в формировании паводков, определяя масштаб и вероятность стока осадков. Современные технологии дистанционного зондирования, включая спутники SMOS, SMAP и ASCAT, а также БПЛА, позволяют эффективно мониторить этот показатель на больших территориях. В Восточно-Казахстанской области, подверженной весенним половодьям, спутниковые данные могут дополнять наблюдения Казгидромета, обеспечивая раннее выявление зон преднасыщения почв. Интеграция данных о влажности, снежном покрове, рельефе и метеоусловиях в численные модели с применением машинного обучения открывает возможности для точного прогнозирования паводков и оценки риска по районам. Беспилотники позволяют детально обследовать плотины и городские территории на предмет фильтрации и переувлажнения. Внедрение этих технологий требует калибровки данных под местные условия, развития инфраструктуры и подготовки специалистов. Такой подход повысит точность предупреждений и снизит ущерб от наводнений, особенно в условиях усиливающегося воздействия климатических изменений.

Список литературы

1. The impacts of rainfall and soil moisture on flood hazards in a humid mountainous catchment: a modeling investigation / T. Yu et al // *Frontiers in Earth Science*. – 2023. – № 11. – P. 1285766. frontiersin.org.
2. The relative importance of antecedent soil moisture and precipitation in flood generation in the Yangtze River basin / Q. Ran et al // *Hydrology and Earth System Sciences*. – 2022. – № 26. – P. 4919-4936. hess.copernicus.org.
3. Initial Soil Moisture Effects on Flash Flood Generation – A Comparison Between Basins of Contrasting Hydro-Climatic Conditions / M.G. Grillakis et al // *J. Hydrol.* – 2016. – № 541. – P. 206-217. <https://doi.org/10.1016/j.jhydrol.2016.03.007>.
4. The Relative Importance of Different Flood-Generating Mechanisms across Europe / W.R. Berghuijs // *J.W. Water Resour. Res.* – 2019. – № 55. – P. 4582-4593. <https://doi.org/10.1029/2019WR024841>.
5. Orth R. Drought Reduces Blue-Water Fluxes More Strongly than Green-Water Fluxes in Europe / R. Orth, G. Destouni // *Nat. Commun.* – 2018. – № 9. – P. 3602. <https://doi.org/10.1038/s41467-018-06013-7>.
6. Yang W. Classifying Floods by Quantifying Driver Contributions in the Eastern Monsoon Region of China / W. Yang, H. Yang D. Yang // *J. Hydrol.* – 2020. – № 585. – P. 124767. <https://doi.org/10.1016/j.jhydrol.2020.124767>.
7. Study on the Dominant Mechanism of Extreme Flow Events in the Middle and Lower Reaches of the Yangtze River / J. Wang et al // *China Rural Water Hydropower*. – 2022. – № 06. – P. 119-124.
8. Sharma S. Baseflow Significantly Contributes to River Floods in Peninsular India / S. Sharma, P.P. Mujumdar // *Sci. Rep.* – 2024. – № 14. – P. 1251. <https://doi.org/10.1038/s41598-024-51850-w>.
9. Effects in Flood Drivers Challenge Estimates of Extreme River Floods / S. Jiang et al // *J. Compounding Sci. Adv.* – 2024. – № 10. – P. eadl4005. <https://doi.org/10.1126/sciadv.adl4005>.
10. Close Co-Variation Between Soil Moisture and Runoff Emerging from Multi-Catchment Data Across Europe / N. Ghajarnia et al // *G. Sci. Rep.* – 2020. – № 10. – P. 4817. <https://doi.org/10.1038/s41598-020-61621-y>.
11. Assimilation of surface- and root-zone ASCAT soil moisture products into rainfall-runoff modeling / L. Brocca et al // *IEEE Trans. Geosci. Remote Sens.* – 2012. – № 50(7). – P. 2542-2555. [mdpi.com](https://doi.org/10.1109/TGRS.2012.2198888).
12. Munawar H.S. Remote Sensing Methods for Flood Prediction: A Review / H.S. Munawar, A.W.A. Hammad, S.T. Waller // *Sensors*. – 2022. – № 22(3). – P. 960. [mdpi.com](https://doi.org/10.3390/s22030960).

13. <https://smap.jpl.nasa.gov/>
14. Application of Soil Moisture Data Assimilation in Flood Forecasting of Xun River in Hanjiang River Basin / J. Bai et al // *Water*. – 2022. – № 14(24). – P. 4061. [mdpi.com](https://mdpi.com/1422-0067/14/24/4061)
15. Exploring Sentinel-1 and Sentinel-2 diversity for flood inundation mapping using deep learning / G. Konapala et al // *ISPRS Journal of Photogrammetry and Remote Sensing*. – 2021. – № 180. – P. 163-173. [mdpi.com](https://doi.org/10.1016/j.isprsjprs.2021.103111)
16. Родионова Н.В. Оценка влажности почвы по радарным данным на основе множественной регрессии / Н.В. Родионова // *Распространение радиоволн*. – 2023. – С. 432-436.
17. <https://innoter.com/>
18. Волчек А.А. Источники данных глобального мониторинга влажности почвы средствами дистанционного зондирования поверхности земли / А.А. Волчек, Д.О. Петров // *Гидрометеорология и экология*. – 2021. – № 1(100). – С. 38-43.
19. Investigating Soil Moisture–Climate Interactions in a Changing Climate: A Review / S.I. Seneviratne et al // *Earth-Sci. Rev.* – 2010. – № 99. – P. 125-161. <https://doi.org/10.1016/j.earscirev.2010.02.004>.
20. Ground, Proximal, and Satellite Remote Sensing of Soil Moisture / E. Babaeian et al // *M. Rev. Geophys.* – 2019. – № 57. – P. 530-616. <https://doi.org/10.1029/2018RG000618>.
21. Accuracy Calibration and Evaluation of Capacitance-Based Soil Moisture Sensors for a Variety of Soil Properties / B. Li et al // *Agric. Water Manag.* – 2022. – № 273. – P. 107913. <https://doi.org/10.1016/j.agwat.2022.107913>.
22. Soil Moisture Measurement for Ecological and Hydrological Watershed-Scale Observatories: A Review / D.A. Robinson et al // *Vadose Zone J.* – 2008. – № 7. – P. 358-389. <https://doi.org/10.2136/vzj2007.0143>.
23. Validation Analysis of SMAP and AMSR2 Soil Moisture Products over the United States Using Ground-Based Measurements / X. Zhang et al // *S. Remote Sens.* – 2017. – № 9. – P. 104. <https://doi.org/10.3390/rs9020104>.
24. Assessing In-Field Soil Moisture Variability in the Active Root Zone Using Granular Matrix Sensors / B. Hodges et al // *Agric. Water Manag.* – 2023. – № 282. – P. 108268. <https://doi.org/10.1016/j.agwat.2023.108268>.
25. The International Soil Moisture Network: Serving Earth System Science for over a Decade / W. Dorigo et al // *Hydrol. Earth Syst. Sci.* – 2021. – № 25. – P. 5749-5804. <https://doi.org/10.5194/hess-25-5749-2021>.
26. QLB-NET: A Dense Soil Moisture and Freeze–Thaw Monitoring Network in the Qinghai Lake Basin on the Qinghai–Tibetan Plateau / L. Chai et al // *Bull. Am. Meteorol. Soc.* – 2024. – № 105. – P. E584-E604. <https://doi.org/10.1175/bams-d-23-0186.1>.
27. Forschungsarbeiten zum Bodenwasserhaushalt in der kasachischen Steppe / L. Haselow et al // *Wasserrwirtsch.* – 2020. – № 110. – P. 34-40. <https://doi.org/10.1007/s35147-020-0366-2>.
28. A Review of Satellite-Derived Soil Moisture and Its Usage for Flood Estimation / S. Kim et al // *Remote Sens. Earth Syst. Sci.* – 2019. – № 2. – P. 225-246. <https://doi.org/10.1007/s41976-019-00025-7>.
29. Satellite Remote Sensing of Soil Moisture for Hydrological Applications: A Review of Issues to Be Solved. In *ICT for Smart Water Systems: Measurements and Data Science* / L. Zhuo et al // *The Handbook of Environmental Chemistry*; Springer: Cham, Switzerland. – 2019. – Vol. 102. https://doi.org/10.1007/978-3-030-2019-3_94.
30. Chen Y. An Improved Global Remote-Sensing-Based Surface Soil Moisture (RSSSM) Dataset Covering 2003-2018 / Y. Chen, X. Feng, B. Fu // *Earth Syst. Sci.* – 2021. – № 13. – P. 1-31. <https://doi.org/10.5194/essd-13-1-2021>.
31. Global Soil Moisture Patterns Observed by Spaceborne Microwave Radiometers and Scatterometers / R.A. De Jeu et al // *Surv. Geophys.* – 2008. – № 29. – P. 399-420. <https://doi.org/10.1007/s10712-008-9044-0>.
32. Monitoring Hydrological Changes with Satellite Data: Spring Thaw's Effect on Soil Moisture and Groundwater in Seasonal Freezing–Thawing Zones / J. Wang et al // *J. Hydrol.* – 2023. – № 626. – P. 130365. <https://doi.org/10.1016/j.jhydrol.2023.130365>.
33. Kashyap B. Sensing methodologies in agriculture for soil moisture and nutrient monitoring / B. Kashyap, R. Kumar // *IEEE Access*. – 2021. – T. 9. – P. 14095-14121.

34. Noborio K. Measurement of soil water content and electrical conductivity by time domain reflectometry: a review / K. Noborio // *Computers and electronics in agriculture*. – 2001. – T. 31, № 3. – P. 213-237.
35. A generalized frequency domain reflectometry modeling technique for soil electrical properties determination / J. Minet et al // *Vadose zone journal*. – 2010. – T. 9, № 4. – P. 1063-1072.
36. SU S.L. A critical review of soil moisture measurement / S.L. SU, D.N. Singh, M.S. Baghini // *Measurement*. – 2014. – T. 54. – P. 92-105.
37. State of the art in large-scale soil moisture monitoring / T.E. Ochsner et al // *Soil Science Society of America Journal*. – 2013. – T. 77, № 6. – P. 1888-1919.
38. Soil moisture measurement for ecological and hydrological watershed-scale observatories: A review / D.A. Robinson et al // *Vadose zone journal*. – 2008. – T. 7, № 1. – P. 358-389.
39. Initial soil moisture retrievals from the METOP-A Advanced Scatterometer (ASCAT) / Z. Bartalis et al // *Geophysical Research Letters*. – 2007. – T. 34, № 20.
40. Visual sensing for urban flood monitoring / S.W. Lo et al // *Sensors*. – 2015. – T. 15, № 8. – P. 20006-20029.
41. Kaku K. Satellite remote sensing for disaster management support: A holistic and staged approach based on case studies in Sentinel Asia / K. Kaku // *International Journal of Disaster Risk Reduction*. – 2019. – T. 33. – P. 417-432.
42. <https://developers.google.com/>
43. Soil Moisture Measuring Techniques and Factors Affecting the Moisture Dynamics: A Comprehensive Review / A. Sarwar et al // *Sustainability*. – 2022. – № 14(18). – P. 11538.mdpi.commdpi.com.
44. Deep Learning-Based Framework for Soil Moisture Content Retrieval of Bare Soil from Satellite Data / M. Daboor et al // *Remote Sensing*. – 2023. – № 15(7). – P. 1916.mdpi.commdpi.com.
45. Assessing the Potential of UAV-Based Multispectral and Thermal Data to Estimate Soil Water Content Using Geophysical Methods / Y. Guan et al // *Remote Sensing*. – 2024. – № 16(1). – P. 61. (Published 22 Dec 2023)mdpi.commdpi.com.
46. Review of Machine Learning Approaches for Biomass and Soil Moisture Retrievals from Remote Sensing Data / I. Ali et al // *Remote Sensing*. – 2015. – № 7. – P. 16398-16421.mdpi.com.
47. COSMOS: The Cosmic-Ray Soil Moisture Observing System / M. Zreda et al // *Hydrology and Earth System Sciences*. – 2012. – № 16. – P. 4079-4099.
48. Soil moisture measurement for ecological and hydrological watershed-scale observatories: A review / D.A. Robinson et al // *Vadose Zone Journal*. – 2008. – № 7(1). – P. 358-389.
49. The Soil Moisture Active Passive (SMAP) Mission / D. Entekhabi et al // *Proceedings of the IEEE*. – 2010. – № 98(5). – P. 704-716.
50. The SMOS Mission: New Tool for Monitoring Key Elements of the Global Water Cycle / Y.H. Kerr et al // *Proceedings of the IEEE*. – 2010. – № 98(5). – P. 666-687.
51. Google Earth Engine: Planetary-scale geospatial analysis for everyone / N. Gorelick et al // *Remote Sensing of Environment*. – 2017. – № 202. – P. 18-27.sciencedirect.com.
52. ESA CCI Soil Moisture for improved Earth system monitoring: Evaluation of the Climate Data Record / W. Dorigo et al // *Remote Sensing of Environment*. – 2017. – № 203. – P. 185-201.
53. Soil moisture estimation through ASCAT and AMSR-E sensors: An intercomparison and validation study across Europe / L. Brocca et al // *Remote Sensing of Environment*. – 2011. – № 115(12). – P. 3390-3408.
54. Flood Detection and Susceptibility Mapping Using Sentinel-1 Remote Sensing Data and a Machine Learning Approach (Bagging-KNN) / H. Shahabi et al // *Remote Sensing*. – 2020. – № 12(2). – P. 266.
55. Influence of changes in rainfall and soil moisture on trends in flooding (study in Mediterranean region) / Y. Trambly et al // *Journal of Hydrology*. – 2018. – № 560. – P. 245-258.
56. Anusha N. Flood detection and flood mapping using multi-temporal synthetic aperture radar and optical data / N. Anusha, B. Bharathi // *Egyptian Journal of Remote Sensing and Space Science*. – 2020. – № 23(2). – P. 207-219.
57. Atar M. Retrieval of Soil Moisture Using Time Series of Radar and Optical Remote Sensing Data at 10 m Resolution / M. Atar, R. Shah-Hosseini, O. Ghaffari // *Environ. Sci. Proc.* – 2024. – № 29. – P. 75. <https://doi.org/10.3390/ECRS2023-16861>.
58. Chen, Y. An Improved Remote Sensing-Based Global Surface Soil Moisture Dataset (RSSSM, 2003-2020) [Dataset]. PANGAEA 2022. <https://doi.org/10.1594/PANGAEA.940004>.

59. Dodin A. Principal Characteristics of the Geological Structure and Genesis of the Eastern Part of the Altai-Sayan Structural Zone / A. Dodin // In Natural Conditions of the Krasnoyarsk Region; Nauka: Moskva, Russia. – 1961. – p. 99-125.
60. A Sentinel-1 SAR-Based Global 1-km Resolution Soil Moisture Data Product: Algorithm and Preliminary Assessment. Remote Sens / D. Fan et al // Environ. – 2025. – № 318. – P. 114579. <https://doi.org/10.1016/j.rse.2024.114579>.
61. Gao Y. Light Thinning Can Improve Soil Water Availability and Water Holding Capacity of Plantations in Alpine Mountains / Y. Gao et al // Front. Plant Sci. – 2022. – № 13. – P. 1032057. <https://doi.org/10.3389/fpls.2022.1032057>.
62. Ensemble of Optimised Machine Learning Algorithms for Predicting Surface Soil Moisture Content at a Global Scale / Q. Han et al // Geosci. Model Dev. – 2023. – № 16. – P. 5825-5845. <https://doi.org/10.5194/gmd-16-5825-2023>.
63. Understanding the Impacts of Predecessor Rain Events on Flood Hazard in a Changing Climate / A. Khatun et al // Hydrol. Process. – 2022. – № 36. – P. e14500. <https://doi.org/10.1002/hyp.14500>.
64. Augmenting Daily MODIS LST with AIRS Surface Temperature Retrievals to Estimate Ground Temperature and Permafrost Extent in High Mountain Asia / K.Y. Kim et al // Remote Sens. Environ. – 2024. – № 305. – P. 114075. <https://doi.org/10.1016/j.rse.2024.114075>.
65. Assessment of ERA5-Land Volumetric Soil Water Layer Product Using In Situ and SMAP Soil Moisture Observations / P. Lal et al // IEEE Geosci. Remote Sens. Lett. – 2022. – № 19. – P. 2508305. <https://doi.org/10.1109/LGRS.2022.3223985>.
66. Кабжанова Г.Р. Рахимжанов, Б.К.; Тулеукулова, Д.Т. Оценка возможностей дистанционного мониторинга влажности почвы на территории Северного Казахстана / Г.Р. Кабжанова, Б.К. Рахимжанов, Д.Т. Тулеукулова // Вестник науки КазАТУ им. С.Сейфуллина. – 2024. – № 4(123).

References

1. The impacts of rainfall and soil moisture on flood hazards in a humid mountainous catchment: a modeling investigation / T. Yu et al // Frontiers in Earth Science. – 2023. – № 11. – R. 1285766. [frontiersin.org](https://www.frontiersin.org). (In English).
2. The relative importance of antecedent soil moisture and precipitation in flood generation in the Yangtze River basin / Q. Ran et al // Hydrology and Earth System Sciences. – 2022. – № 26. – R. 4919-4936. [hess.copernicus.org](https://www.copernicus.org). (In English).
3. Initial Soil Moisture Effects on Flash Flood Generation – A Comparison Between Basins of Contrasting Hydro-Climatic Conditions / M.G. Grillakis et al // J. Hydrol. – 2016. – № 541. – R. 206-217. <https://doi.org/10.1016/j.jhydrol.2016.03.007>. (In English).
4. The Relative Importance of Different Flood-Generating Mechanisms across Europe / W.R. Berghuijs // J.W. Water Resour. Res. – 2019. – № 55. – R. 4582-4593. <https://doi.org/10.1029/2019WR024841>. (In English).
5. Orth R. Drought Reduces Blue-Water Fluxes More Strongly than Green-Water Fluxes in Europe / R. Orth, G. Destouni // Nat. Commun. – 2018. – № 9. – R. 3602. <https://doi.org/10.1038/s41467-018-06013-7>. (In English).
6. Yang W. Classifying Floods by Quantifying Driver Contributions in the Eastern Monsoon Region of China / W. Yang, H. Yang D. Yang // J. Hydrol. – 2020. – № 585. – R. 124767. <https://doi.org/10.1016/j.jhydrol.2020.124767>. (In English).
7. Study on the Dominant Mechanism of Extreme Flow Events in the Middle and Lower Reaches of the Yangtze River / J. Wang et al // China Rural Water Hydropower. – 2022. – № 06. – R. 119-124. (In English).
8. Sharma S. Baseflow Significantly Contributes to River Floods in Peninsular India / S. Sharma, P.P. Mujumdar // Sci. Rep. – 2024. – № 14. – R. 1251. <https://doi.org/10.1038/s41598-024-51850-w>. (In English).
9. Effects in Flood Drivers Challenge Estimates of Extreme River Floods / S. Jiang et al // J. Compounding Sci. Adv. – 2024. – № 10. – R. eadl4005. <https://doi.org/10.1126/sciadv.adl4005>. (In English).
10. Close Co-Variation Between Soil Moisture and Runoff Emerging from Multi-Catchment Data Across Europe / N. Ghajarnia et al // G. Sci. Rep. – 2020. – № 10. – R. 4817. <https://doi.org/10.1038/s41598-020-61621-y>. (In English).

11. Assimilation of surface- and root-zone ASCAT soil moisture products into rainfall–runoff modeling / L. Brocca et al // *IEEE Trans. Geosci. Remote Sens.* – 2012. – № 50(7). – R. 2542-2555.mdp.commdpi.com. (In English).
12. Munawar H.S. Remote Sensing Methods for Flood Prediction: A Review / H.S. Munawar, A.W.A. Hammad, S.T. Waller // *Sensors.* – 2022. – № 22(3). – R. 960.mdp.commdpi.com. (In English).
13. <https://smap.jpl.nasa.gov/>. (In English).
14. Application of Soil Moisture Data Assimilation in Flood Forecasting of Xun River in Hanjiang River Basin / J. Bai et al // *Water.* – 2022. – № 14(24). – R. 4061.mdp.commdpi.com. (In English).
15. Exploring Sentinel-1 and Sentinel-2 diversity for flood inundation mapping using deep learning / G. Konapala et al // *ISPRS Journal of Photogrammetry and Remote Sensing.* – 2021. – № 180. – R. 163-173.mdp.com. (In English).
16. Rodionova N.V. Otsenka vlazhnosti pochvy po radarnym dannym na osnove mnozhestvennoi regressii / N.V. Radionova // *Rasprostranenie radiovoln.* – 2023. – S. 432-436. (In Russian).
17. <https://innoter.com/>. (In English).
18. Volchek A.A. Istochniki dannykh global'nogo monitoringa vlazhnosti pochvy sredstvami distantsionnogo zondirovaniya poverkhnosti zemli / A.A. Volchek, D.O. Petrov // *Gidrometeorologiya i ekhologiya.* – 2021. – № 1(100). – S. 38-43. (In Russian).
19. Investigating Soil Moisture–Climate Interactions in a Changing Climate: A Review / S.I. Seneviratne et al // *Earth-Sci. Rev.* – 2010. – № 99. – R. 125-161. <https://doi.org/10.1016/j.earscirev.2010.02.004>. (In English).
20. Ground, Proximal, and Satellite Remote Sensing of Soil Moisture / E. Babaeian et al // *M. Rev. Geophys.* – 2019. – № 57. – R. 530-616. <https://doi.org/10.1029/2018RG000618>. (In English).
21. Accuracy Calibration and Evaluation of Capacitance-Based Soil Moisture Sensors for a Variety of Soil Properties / V. Li et al // *Agric. Water Manag.* – 2022. – № 273. – R. 107913. <https://doi.org/10.1016/j.agwat.2022.107913>. (In English).
22. Soil Moisture Measurement for Ecological and Hydrological Watershed-Scale Observatories: A Review / D.A. Robinson et al // *Vadose Zone J.* – 2008. – № 7. – R. 358-389. <https://doi.org/10.2136/vzj2007.0143>. (In English).
23. Validation Analysis of SMAP and AMSR2 Soil Moisture Products over the United States Using Ground-Based Measurements / X. Zhang et al // *S. Remote Sens.* – 2017. – № 9. – R. 104. <https://doi.org/10.3390/rs9020104>. (In English).
24. Assessing In-Field Soil Moisture Variability in the Active Root Zone Using Granular Matrix Sensors / V. Hodges et al // *Agric. Water Manag.* – 2023. – № 282. – R. 108268. <https://doi.org/10.1016/j.agwat.2023.108268>. (In English).
25. The International Soil Moisture Network: Serving Earth System Science for over a Decade / W. Dorigo et al // *Hydrol. Earth Syst. Sci.* – 2021. – № 25. – R. 5749-5804. <https://doi.org/10.5194/hess-25-5749-2021>. (In English).
26. QLB-NET: A Dense Soil Moisture and Freeze–Thaw Monitoring Network in the Qinghai Lake Basin on the Qinghai–Tibetan Plateau / L. Chai et al // *Bull. Am. Meteorol. Soc.* – 2024. – № 105. – R. E584-E604. <https://doi.org/10.1175/bams-d-23-0186.1>. (In English).
27. Forschungsarbeiten zum Bodenwasserhaushalt in der kasachischen Steppe / L. Haselow et al // *Wasserwirtsch.* – 2020. – № 110. – R. 34-40. <https://doi.org/10.1007/s35147-020-0366-2>. (In English).
28. A Review of Satellite-Derived Soil Moisture and Its Usage for Flood Estimation / S. Kim et al // *Remote Sens. Earth Syst. Sci.* – 2019. – № 2. – R. 225-246. <https://doi.org/10.1007/s41976-019-00025-7>. (In English).
29. Satellite Remote Sensing of Soil Moisture for Hydrological Applications: A Review of Issues to Be Solved. In *ICT for Smart Water Systems: Measurements and Data Science* / L. Zhuo et al // *The Handbook of Environmental Chemistry*; Springer: Cham, Switzerland. – 2019. – Vol. 102. https://doi.org/10.1007/698_2019_394. (In English).
30. Chen Y. An Improved Global Remote-Sensing-Based Surface Soil Moisture (RSSSM) Dataset Covering 2003-2018 / Y. Chen, X. Feng, B. Fu // *Earth Syst. Sci.* – 2021. – № 13. – R. 1-31. <https://doi.org/10.5194/essd-13-1-2021>. (In English).
31. Global Soil Moisture Patterns Observed by Spaceborne Microwave Radiometers and Scatterometers / R.A. De Jeu et al // *Surv. Geophys.* – 2008. – № 29. – R. 399-420. <https://doi.org/10.1007/s10712-008-9044-0>. (In English).

32. Monitoring Hydrological Changes with Satellite Data: Spring Thaw's Effect on Soil Moisture and Groundwater in Seasonal Freezing–Thawing Zones / J. Wang et al // J. Hydrol. – 2023. – № 626. – R. 130365. <https://doi.org/10.1016/j.jhydrol.2023.130365>. (In English).
33. Kashyap B. Sensing methodologies in agriculture for soil moisture and nutrient monitoring / B. Kashyap, R. Kumar // IEEE Access. – 2021. – Т. 9. – R. 14095-14121. (In English).
34. Noborio K. Measurement of soil water content and electrical conductivity by time domain reflectometry: a review / K. Noborio // Computers and electronics in agriculture. – 2001. – Т. 31, № 3. – R. 213-237. (In English).
35. A generalized frequency domain reflectometry modeling technique for soil electrical properties determination / J. Minet et al // Vadose zone journal. – 2010. – Т. 9, № 4. – R. 1063-1072. (In English).
36. SU S.L. A critical review of soil moisture measurement / S.L. SU, D.N. Singh, M.S. Baghini // Measurement. – 2014. – Т. 54. – R. 92-105. (In English).
37. State of the art in large-scale soil moisture monitoring / T.E. Ochsner et al // Soil Science Society of America Journal. – 2013. – Т. 77, № 6. – R. 1888-1919. (In English).
38. Soil moisture measurement for ecological and hydrological watershed-scale observatories: A review / D.A. Robinson et al // Vadose zone journal. – 2008. – Т. 7, № 1. – R. 358-389. (In English).
39. Initial soil moisture retrievals from the METOP-A Advanced Scatterometer (ASCAT) / Z. Bartalis et al // Geophysical Research Letters. – 2007. – Т. 34, № 20. (In English).
40. Visual sensing for urban flood monitoring / S.W. Lo et al // Sensors. – 2015. – Т. 15, № 8. – R. 20006-20029. (In English).
41. Kaku K. Satellite remote sensing for disaster management support: A holistic and staged approach based on case studies in Sentinel Asia / K. Kaku // International Journal of Disaster Risk Reduction. – 2019. – Т. 33. – R. 417-432. (In English).
42. <https://developers.google.com/> (In English).
43. Soil Moisture Measuring Techniques and Factors Affecting the Moisture Dynamics: A Comprehensive Review / A. Sarwar et al // Sustainability. – 2022. – № 14(18). – R. 11538.mdpi.commdpi.com. (In English).
44. Deep Learning-Based Framework for Soil Moisture Content Retrieval of Bare Soil from Satellite Data / M. Dabboor et al // Remote Sensing. – 2023. – № 15(7). – R. 1916.mdpi.commdpi.com. (In English).
45. Assessing the Potential of UAV-Based Multispectral and Thermal Data to Estimate Soil Water Content Using Geophysical Methods / Y. Guan et al // Remote Sensing. – 2024. – № 16(1). – R. 61. (Published 22 Dec 2023)mdpi.commdpi.com. (In English).
46. Review of Machine Learning Approaches for Biomass and Soil Moisture Retrievals from Remote Sensing Data / I. Ali et al // Remote Sensing. – 2015. – № 7. – R. 16398-16421.mdpi.com. (In English).
47. COSMOS: The Cosmic-Ray Soil Moisture Observing System / M. Zreda et al // Hydrology and Earth System Sciences. – 2012. – № 16. – R. 4079-4099. (In English).
48. Soil moisture measurement for ecological and hydrological watershed-scale observatories: A review / D.A. Robinson et al // Vadose Zone Journal. – 2008. – № 7(1). – R. 358-389. (In English).
49. The Soil Moisture Active Passive (SMAP) Mission / D. Entekhabi et al // Proceedings of the IEEE. – 2010. – № 98(5). – R. 704-716. (In English).
50. The SMOS Mission: New Tool for Monitoring Key Elements of the Global Water Cycle / Y.H. Kerr et al // Proceedings of the IEEE. – 2010. – № 98(5). – R. 666-687. (In English).
51. Google Earth Engine: Planetary-scale geospatial analysis for everyone / N. Gorelick et al // Remote Sensing of Environment. – 2017. – № 202. – R. 18-27.sciencedirect.com. (In English).
52. ESA CCI Soil Moisture for improved Earth system monitoring: Evaluation of the Climate Data Record / W. Dorigo et al // Remote Sensing of Environment. – 2017. – № 203. – R. 185-201. (In English).
53. Soil moisture estimation through ASCAT and AMSR-E sensors: An intercomparison and validation study across Europe / L. Brocca et al // Remote Sensing of Environment. – 2011. – № 115(12). – R. 3390-3408. (In English).
54. Flood Detection and Susceptibility Mapping Using Sentinel-1 Remote Sensing Data and a Machine Learning Approach (Bagging-KNN) / H. Shahabi et al // Remote Sensing. – 2020. – № 12(2). – R. 266. (In English).

55. Influence of changes in rainfall and soil moisture on trends in flooding (study in Mediterranean region) / Y. Trambly et al // Journal of Hydrology. – 2018. – № 560. – R. 245-258. (In English).
56. Anusha N. Flood detection and flood mapping using multi-temporal synthetic aperture radar and optical data / N. Anusha, B. Bharathi // Egyptian Journal of Remote Sensing and Space Science. – 2020. – № 23(2). – R. 207-219. (In English).
57. Atar M. Retrieval of Soil Moisture Using Time Series of Radar and Optical Remote Sensing Data at 10 m Resolution / M. Atar, R. Shah-Hosseini, O. Ghaffari // Environ. Sci. Proc. – 2024. – № 29. – R. 75. <https://doi.org/10.3390/ECRS2023-16861>. (In English).
58. Chen, Y. An Improved Remote Sensing-Based Global Surface Soil Moisture Dataset (RSSSM, 2003-2020) [Dataset]. PANGAEA 2022. <https://doi.org/10.1594/PANGAEA.940004>. (In English).
59. Dodin A. Principal Characteristics of the Geological Structure and Genesis of the Eastern Part of the Altai-Sayan Structural Zone / A. Dodin // In Natural Conditions of the Krasnoyarsk Region; Nauka: Moskva, Russia. – 1961. – r. 99-125. (In English).
60. A Sentinel-1 SAR-Based Global 1-km Resolution Soil Moisture Data Product: Algorithm and Preliminary Assessment. Remote Sens / D. Fan et al // Environ. – 2025. – № 318. – R. 114579. <https://doi.org/10.1016/j.rse.2024.114579>. (In English).
61. Gao Y. Light Thinning Can Improve Soil Water Availability and Water Holding Capacity of Plantations in Alpine Mountains / Y. Gao et al // Front. Plant Sci. – 2022. – № 13. – R. 1032057. <https://doi.org/10.3389/fpls.2022.1032057>. (In English).
62. Ensemble of Optimised Machine Learning Algorithms for Predicting Surface Soil Moisture Content at a Global Scale / Q. Han et al // Geosci. Model Dev. – 2023. – № 16. – R. 5825-5845. <https://doi.org/10.5194/gmd-16-5825-2023>. (In English).
63. Understanding the Impacts of Predecessor Rain Events on Flood Hazard in a Changing Climate / A. Khatun et al // Hydrol. Process. – 2022. – № 36. – R. e14500. <https://doi.org/10.1002/hyp.14500>. (In English).
64. Augmenting Daily MODIS LST with AIRS Surface Temperature Retrievals to Estimate Ground Temperature and Permafrost Extent in High Mountain Asia / K.Y. Kim et al // Remote Sens. Environ. – 2024. – № 305. – R. 114075. <https://doi.org/10.1016/j.rse.2024.114075>. (In English).
65. Assessment of ERA5-Land Volumetric Soil Water Layer Product Using In Situ and SMAP Soil Moisture Observations / R. Lal et al // IEEE Geosci. Remote Sens. Lett. – 2022. – № 19. – R. 2508305. <https://doi.org/10.1109/LGRS.2022.3223985>. (In English).
66. Kabzhanova G.R. Rakhimzhanov, B.K.; Tulekulova, D.T. Otsenka vozmozhnostei distantsionnogo monitoringa vlazhnosti pochvy na territorii Severnogo Kazakhstana / G.R. Kabzhanova, B.K. Rakhimzhanov, D.T. Tulekulova // Vestnik nauki KaZATU im. S.Seifullina. – 2024. – № 4(123). (In Russian).

Благодарность

Работа выполнена при финансовой поддержке Комитета науки Министерства науки и высшего образования Республики Казахстан в рамках программно-целевого финансирования по научным, научно-техническим программам на 2024-2026гг по теме «Разработка системы прогнозирования катастрофических паводков в Восточно-Казахстанской области с применением данных ДЗЗ, ГИС-технологий и машинного обучения» (ИРН BR24992899).

А.А. Бондарович¹, А. Мәуліт^{2*}, И.А. Очерedyкo³, Ж.З. Жантасова³

¹Алтай мемлекеттік университеті, Алтай өлкесі,
Барнаул қаласы, Ленин даңғылы, 61

²Шәкәрім университеті,
071412, Қазақстан Республикасы, Семей қ., Глинка к-сі, 20 А

³С. Аманжолов атын. Шығыс Қазақстан университеті,
Өскемен қаласы, Қазақстан көшесі 55.

*e-mail: mauilit.almas@gmail.com

СУ ТАСҚЫНЫНА БЕЙІМ АУМАҚТАҒЫ ТОПЫРАҚ ЫЛҒАЛДЫЛЫҒЫН БАҒАЛАУДАҒЫ ҚАШЫҚТЫҚТАН ЗОНДТАУ ТЕХНОЛОГИЯЛАРЫ: ШОЛУ

Топырақ ылғалдылығы жер үсті ағындары мен су тасқынының пайда болуында, әсіресе көктемгі қар мен қатты жауын-шашын жағдайында шешуші рөл атқарады. Шығыс Қазақстан облысы сияқты су тасқыны қаупі жоғары аумақтар үшін топырақ ылғалдылығы мониторингінің

өзектілігі артып келеді. Бұл мақалада су тасқынын болжау үшін топырақ ылғалдылығын бағалау үшін қолданылатын заманауи қашықтықтан зондтау әдістеріне (ЖҚЗ) шолу берілген. Гидрологиялық модельдерге спутниктік деректерді (SMAP, Sentinel-1/2, SMOS және т.б.) біріктірудің тиімділігін көрсететін жаһандық және аймақтық зерттеулер қарастырылды. Топырақ ылғалдылығын өлшеудің жер үсті және қашықтықтан әдістеріне салыстырмалы талдау жүргізілді, радиометрлерді, радарларды, мультиспектрлік сенсорларды, сондай-ақ ұшқышсыз ұшу аппараттарын (ҰҰА) қолдану тәсілдері сипатталды. Деректерді өңдеу алгоритмдеріне, соның ішінде спектрлік индекстерге, Машиналық оқыту әдістеріне және нейрондық желі модельдеріне ерекше назар аударылады. Картаға түсіру және бақылау тапсырмаларында бағдарламалық жасақтаманың (Google Earth Engine, Snap, ArcGIS, QGIS) мүмкіндіктері талданады. Шолу су тасқыны туралы ерте ескертудің дәлдігін арттыруда және су тәуекелдерін тұрақты басқару үшін негіздерді қалыптастыруда ЖҚЗ әлеуетін көрсетеді.

Түйін сөздер: топырақ ылғалдылығы, қашықтықтан зондтау, су тасқыны, спутниктік мониторинг, Шығыс Қазақстан облысы, Машиналық оқыту, нейрожелілер, ГАЗ, мультиспектралды деректер, SMAP, Sentinel.

A.A. Bondarovich¹, A. Maulit^{2*}, I.A. Ocheredko³, J.Z. Zhantasova³

¹Altai State University, 61 Lenin Ave.,
Barnaul, Altai Territory

²Semey Shakarim University,
071412, Republic of Kazakhstan, Semey, Glinka str., 20 A

³S.Amanzholov East Kazakhstan University,
Ust-Kamenogorsk, 55 Kazakhstan Street.

*e-mail: maulit.almas@gmail.com

REMOTE SENSING TECHNOLOGIES IN ASSESSING SOIL MOISTURE IN FLOOD-PRONE AREAS: REVIEW

Soil moisture plays a key role in the formation of surface runoff and floods, especially in conditions of spring snowmelt and extreme precipitation. The relevance of soil moisture monitoring is increasing for areas with high flood risk, such as the East Kazakhstan region. This article provides an overview of modern remote sensing (remote sensing) methods used to assess soil moisture in order to predict floods. Global and regional studies demonstrating the effectiveness of integrating satellite data (SMAP, Sentinel-1/2, SMOS, etc.) into hydrological models are considered. A comparative analysis of ground-based and remote methods of measuring soil moisture is carried out, approaches using radiometers, radars, multispectral sensors, as well as unmanned aerial vehicles (UAVs) are described. Special attention is paid to data processing algorithms, including spectral indexes, machine learning methods, and neural network models. The capabilities of the software (Google Earth Engine, SNAP, ArcGIS, QGIS) in mapping and monitoring tasks are analyzed. The review highlights the potential of remote sensing in improving the accuracy of early flood warnings and laying the foundations for sustainable water risk management.

Key words: Keywords: soil moisture, remote sensing, floods, satellite monitoring, East Kazakhstan region, machine learning, neural networks, GIS, multispectral data, SMAP, Sentinel.

Сведения об авторах

Андрей Александрович Бондарович – кандидат географических наук, доцент кафедры экономической географии и картографии, Алтайский государственный университет; e-mail: a9130262571@gmail.com. ORCID: <https://orcid.org/0000-0001-7161-2686>.

Алмасбек Маулит* – докторант Шәкәрім Университеті; e-mail: maulit.almas@gmail.com. ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-0519-3222>.

Игорь Александрович Очередыко – Научный сотрудник технопарка «Shygys Bastau», Восточно-Казахстанский университет им. С.Аманжолова; e-mail: egor007kz@mail.ru.

Женискуль Зейнешовна Жантасова – доцент кафедры компьютерного моделирования и информационных технологий, Восточно-Казахстанский университет им. С. Аманжолова; e-mail: Zheniskul_z@mail.ru.

Авторлар туралы мәліметтер

Андрей Александрович Бондарович – география ғылымдарының кандидаты; Экономикалық география және картография кафедрасының доценті, Алтай мемлекеттік университеті; e-mail: a9130262571@gmail.com. ORCID: <https://orcid.org/0000-0001-7161-2686>.

Алмасбек Мәулит* – Шәкәрім Университеті докторанты; e-mail: maulit.almas@gmail.com. ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-0519-3222>.

Игорь Александрович Очередыко – «Shygys Bastau» технопаркінің ғылыми қызметкері, Шығыс С. Аманжолов атындағы Қазақстан университеті; e-mail: egor007kz@mail.ru.

Жантасова Женискүл Зейнешовна – компьютерлік модельдеу және ақпараттық технологиялар кафедрасының доценті; С. Аманжолов атындағы Шығыс Қазақстан университеті; e-mail: Zheniskul_z@mail.ru.

Information about the authors

Andrey Bondarovich – candidate of Geographical Sciences; Associate Professor of the Department of economic geography and cartography, Altai State University; e-mail: a9130262571@gmail.com. ORCID: <https://orcid.org/0000-0001-7161-2686>.

Almasbek Maulit* – doctoral student of Shakarim University; head of the Technopark «Shygys Bastau», EKV. S. Amanzholova; e-mail: maulit.almas@gmail.com. ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-0519-3222>.

Igor Alexandrovich Ocheredko – researcher of the Technopark «Shygys Bastau», East Kazakhstan University. S. Amanzholova; e-mail: egor007kz@mail.ru.

Zheniskul Zeyneshovna Zhanatasova – associate professor of the Department of computer modeling and information technologies; East Kazakhstan University. S. Amanzholova; e-mail: Zheniskul_z@mail.ru.

Поступила в редакцию 07.06.2025

Поступила после доработки 11.08.2025

Принята к публикации 12.08.2025

[https://doi.org/10.53360/2788-7995-2025-3\(19\)-13](https://doi.org/10.53360/2788-7995-2025-3(19)-13)

MPHTI: 50.41.25



А.М. Исакова^{1*}, О.С. Салыкова¹, Н.А. Дидарбекова², А.А. Артыкбаева¹

¹Костанайский региональный университет имени Ахмет Байтұрсынұлы,
110000, Республика Казахстан, г. Костанай, ул.А.Байтұрсынова, 47

²Национальный центр тестирования
Министерства науки и высшего образования Республики Казахстан
010011, Республика Казахстан, г. Астана, улица Родниковая 1/1

*e-mail: n.a.almira.24@gmail.com

ШКАЛИРОВАНИЕ ТЕСТОВЫХ ЗАДАНИЙ ПО ФИЗИКЕ ДЛЯ КОМПЬЮТЕРНОГО АДАПТИВНОГО ТЕСТИРОВАНИЯ НА ОСНОВЕ МОДЕЛИ РАША

Аннотация: Адаптивное тестирование представляет собой один из наиболее эффективных подходов к цифровой оценке знаний, обеспечивая индивидуализацию процесса за счёт автоматического подбора заданий в зависимости от уровня подготовленности обучающегося. Основными элементами для реализации такого тестирования являются: банк шкалированных заданий, алгоритм адаптации и специализированное программное обеспечение. Формирование качественного банка заданий требует предварительного психометрического анализа, позволяющего оценить их пригодность к использованию в адаптивных системах.

Настоящая статья посвящена эмпирическому анализу набора тестовых заданий по физике с использованием модели Раша. В ходе исследования проведена апробация заданий на репрезентативной выборке учащихся и выполнено шкалирование с применением программы Winsteps. Для каждого задания определены параметры трудности, показатели согласия с моделью и коэффициенты корреляции. Выявлены задания, не соответствующие требованиям адаптивного тестирования – они были исключены из итогового банка. В результате сформирован набор заданий, обладающих устойчивыми статистическими характеристиками и пригодных для дальнейшего использования в компьютерных адаптивных системах оценки знаний.

Представленные результаты подтверждают возможность интеграции полученного банка заданий в информационные образовательные системы и цифровые платформы. В дальнейших публикациях планируется представить алгоритмы построения адаптивного тестирования в реальном времени, а также разработку программного обеспечения для автоматической генерации тестов с учётом шкалированных параметров. Проведённая работа служит основой для создания эффективных цифровых инструментов оценки учебных достижений.

Ключевые слова: адаптивное тестирование, модель Раша, психометрический анализ, шкалирование заданий, информационные технологии в образовании, Winsteps, автоматизированная оценка знаний.