



Научная статья
УДК 528.8:631.58
doi: 10.55186/25876740_2026_69_2_171

ОЦЕНКА ЦИФРОВЫХ МОДЕЛЕЙ РЕЛЬЕФА ДЛЯ КАРТОГРАФИЧЕСКОГО ОБЕСПЕЧЕНИЯ АДАПТИВНО- ЛАНДШАФТНОГО ЗЕМЛЕДЕЛИЯ НА МИКРОЗОНАЛЬНОМ УРОВНЕ С ИСПОЛЬЗОВАНИЕМ ГИС-ТЕХНОЛОГИЙ

Д.В. Холодов¹, Л.Г. Смирнова^{1,2}

¹Белгородский государственный национальный исследовательский университет, Белгород, Россия

²Белгородский федеральный аграрный научный центр Российской академии наук, Белгород, Россия

Аннотация. Проведена сравнительная оценка цифровых моделей рельефа (ЦМР) для картографического обеспечения адаптивно-ландшафтного земледелия на микрозональном уровне. Исследование выполнено в границах рабочего участка на склоновом агроландшафте опытного поля в Белгородской области (участок 8,4 га) в 2025 г. Цель исследования — оценка источников данных цифровых моделей рельефа для создания точной картографической основы при проектировании адаптивно-ландшафтного земледелия на склоновом агроландшафте. Методы включали сравнение глобальных спутниковых моделей (SRTM1 v3, AW3D30, FABDEM с разрешением 30 м) с высокоточной ЦМР, полученной по данным аэрофотосъемки беспилотным летательным аппаратом (БПЛА) с точностью до 3 см/пиксель. Построены и проанализированы карты уклонов и направлений стока, выполнена верификация данными агрохимического анализа почв на содержание подвижного фосфора. Установлено, что спутниковые ЦМР демонстрируют интервалы высот от 2 до 5 м и значительную генерализацию рельефа, полностью нивелируя микроформы (борозды, промоины), что делает невозможным корректное гидрологическое моделирование. ЦМР по данным БПЛА точно отображает микрорельеф, позволила построить карту направлений стока и выявить преобладающее западное направление. Пространственное совпадение зон минимального содержания подвижного фосфора с зонами смыва, определенными по высокоточной ЦМР, подтвердило ее практическую ценность. Для картографического обеспечения проектов адаптивно-ландшафтного земледелия микрозонального уровня, особенно на эрозионно-опасных склонах, необходимо использование высокоточных ЦМР, созданных по данным аэрофотосъемки с БПЛА. Это позволяет выделять эколого-ландшафтные микрозоны, обоснованно размещать противозерозионные элементы и разрабатывать дифференцированные агротехнологии.

Ключевые слова: цифровая модель рельефа, адаптивно-ландшафтное земледелие, точное земледелие, микрозональный уровень, беспилотные летательные аппараты, аэрофотосъемка, эрозия почв, агроэкологическая оценка

Original article

EVALUATION OF DIGITAL ELEVATION MODELS FOR CARTOGRAPHIC SUPPORT OF MICROZONAL-LEVEL ADAPTIVE LANDSCAPE AGRICULTURE USING GIS TECHNOLOGIES

D.V. Kholodov¹, L.G. Smirnova^{1,2}

¹Belgorod State National Research University, Belgorod, Russia

²Belgorod Federal Agricultural Research Center of the Russian Academy of Sciences, Belgorod, Russia

Abstract. A comparative evaluation of digital elevation models (DEMs) for the cartographic support of adaptive landscape agriculture at the microzonal level was conducted. The study was carried out in 2025 within a working plot on a slope agro-landscape of an experimental field in the Belgorod region (plot area 8.4 ha). The aim was to assess data sources of DEMs for creating an accurate cartographic basis for designing adaptive landscape agriculture on slope agro-landscapes. Methods involved comparing global satellite models (SRTM1 v3, AW3D30, FABDEM with 30 m resolution) with a high-precision DEM obtained from unmanned aerial vehicle (UAV) aerial photography data with an accuracy of up to 3 cm/pixel. Slope and flow direction maps were constructed and analyzed, with verification performed using agrochemical soil analysis data for available phosphorus content. It was established that satellite DEMs show elevation intervals of 2 to 5 m and significant relief generalization, completely smoothing out microforms (rills, gullies), which makes correct hydrological modeling impossible. The UAV-based DEM accurately represents microrelief, enabled the construction of a flow direction map, and identified a predominant western direction. The spatial coincidence of zones with minimum available phosphorus content with washout zones defined by the high-precision DEM confirmed its practical value. For the cartographic support of microzonal-level adaptive landscape agriculture projects, especially on erosion-hazardous slopes, it is necessary to use high-precision DEMs created from UAV aerial photography data. This allows for the delineation of ecological landscape microzones, substantiated placement of anti-erosion elements, and development of differentiated agro-technologies.

Keywords: digital elevation model, adaptive landscape agriculture, precision agriculture, microzonal level, unmanned aerial vehicles, aerial photography, soil erosion, agro-ecological assessment

Актуальность. В ходе земельной реформы реорганизация крупных государственных предприятий бывшего Советского Союза привела к формированию новых землепользований разного территориального уровня. Появился разнообразный правовой статус земель сельскохозяйственного назначения. В связи с этим возникла необходимость переформирования землеустроительной документации и проектов внутрихозяйственного землеустройства. Отметим, что вышедший в 2001 г. ФЗ № 78 «О землеустройстве» [1]

не обязывает сельскохозяйственных производителей к разработке актуальных проектов внутрихозяйственного землеустройства, вследствие чего картографические материалы предприятий остаются на уровне 1980-х годов. В Белгородской области в 2014 г. вышло Постановление Губернатора региона № 9 от 4 февраля «Об утверждении Положения о проекте адаптивно-ландшафтной системы земледелия и охраны почв» [2], где указывается, что все землеустройство и землепользование должны иметь проекты

адаптивно-ландшафтной системы земледелия, поэтому возникает задача обеспечения хозяйствующих субъектов разного территориального уровня данными документами.

Использование проектов внутрихозяйственного землеустройства подразумевает зонирование земель по общим территориальным признакам. Опыт прошлых лет показал, что классический метод зонирования не учитывает полную оценку качества земель отдельно взятого поля. Данная проблема решается переходом на

систему оценочных показателей при проектировании адаптивно-ландшафтных систем земледелия. Возникла необходимость в более глубокой дифференциации зональных систем земледелия в соответствии с разнообразными агроэкологическими условиями. Возникла необходимость адаптировать эти системы к различным уровням интенсификации производства, экономическим моделям и требованиям рынка сельскохозяйственной продукции. Решение найдено только через применение устойчивых и безопасных систем земледелия на ландшафтной основе, позволяющие максимально использовать биоклиматический потенциал и наиболее эффективно сочетать природные и антропогенные ресурсы [3, 4, 5, 6, 7].

Современное состояние сельскохозяйственных земель определяется воздействием многих поколений и их современным использованием. Поэтому показатели зонирования должны отражать состояние территории, сложившееся под воздействием природно-хозяйственных факторов [8, 9]. Так как классический метод зонирования не учитывает полную оценку качества земель, то данную проблему можно решить переходом на систему оценочных показателей при проектировании адаптивно-ландшафтных систем земледелия [10]. Стоит отметить, что технологии точного земледелия, используемые в системах адаптивно-ландшафтного земледелия, позволяют выявить неоднородности почвенных показателей в границах отдельных полей и проводить структурирование рабочих участков [11]. При переходе к адаптивно-ландшафтному земледелию необходимо, в первую очередь, хорошее знание специфики местных природных ландшафтов, что требует создания обширной пространственной и тематической информационной базы.

Утвержденная Указом Президента РФ № 145 в 2024 г. Стратегия научно-технологического развития страны [12] регламентирует необходимость перехода к передовым цифровым и интеллектуальным производственным технологиям. В связи с этим возрастает актуальность информационно-технологического обеспечения земледелия. Отдельным направлением развития информационно-технологического обеспечения отечественного земледелия должна стать разработка автоматизированных систем принятия решений по комфортному формированию и дальнейшей обоснованной корректировке (с учетом совершенствования нормативно-справочной информации) адаптивно-ландшафтных систем земледелия (в том числе и на основе ГИС-технологий) как в целом, так и для ее отдельных базовых элементов [13], например создание точной картографическо-плановой основы.

Большая часть территории Центрально-Черноземного региона подвержена почвенной эрозии, вследствие чего создание проектов адаптивно-ландшафтного земледелия для землепользователей, находящихся в данной зоне, приобретает особую значимость. В Белгородской области создание проектов адаптивно-ландшафтного земледелия на данный момент регламентируется постановлением правительства Белгородской области от 22 апреля 2022 г. «Об утверждении Положения о проекте адаптивно-ландшафтной системы земледелия и охраны почв» [14], в рамках которого все собственники и арендаторы земельных участков обязаны разработать соответствующие проекты. Стоит учитывать, что проекты адаптивно-ландшафтной системы земледелия, создаваемые для крупных землепользователей, не соответствуют задачам хозяйствования более мелких хозяйств,

так как многие этапы проектирования имеют свои параметры в зависимости от уровня землепользования, в том числе и различается картографическо-плановая основа. Она является ключевым элементом в реализации проектов адаптивного земледелия.

На данный момент высокий уровень качества картографическо-плановой основы обеспечивается за счет применения современных технологий, таких как дистанционное зондирование Земли, использование глобальных систем позиционирования, использование беспилотных летательных аппаратов (БПЛА) и геоинформационных систем — некоторые из них были рассмотрены ранее [15]. В результате проведенного анализа было выяснено, что дистанционное зондирование Земли спутниковыми системами отличается относительно низким пространственным разрешением, а использование навигационных систем глобального позиционирования не всегда обладает высокой точностью и часто имеет большую погрешность, поэтому оптимальным вариантом для формирования точной картографическо-плановой основы может послужить аэрофотосъемка беспилотными летательными аппаратами.

Однако данные, получаемые в результате аэрофотосъемки территории также требуют обработки в специальных профессиональных геоинформационных системах, где конечный результат представляется в виде ортофотопланов местности и высокоточных цифровых моделей рельефа, которые используются в качестве основы для формирования многих цифровых карт, необходимых при разработке проектов адаптивно-ландшафтного устройства земель. Такими картами, например, могут являться карты уклонов, экспозиции, вертикальной и горизонтальной кривизны, а также их комбинируемые варианты и так далее. Отметим, что в рамках реализации технологии точного земледелия, как элемента адаптивно-ландшафтного земледелия, высокдетализированная цифровая модель местности в том числе активно используется для проведения разного рода процессов интерполяции, результатом которых являются карты неоднородностей показателей плодородия почв. Также цифровые карты активно используются при обосновании и выделении границ эколого-ландшафтных микрозон, которые, в свою очередь, являются неотъемлемым агротехнологическим элементом адаптивно-ландшафтного устройства.

Для проведения агроэкологической оценки общего земельного фонда предприятий данных спутникового мониторинга земли достаточно. На данный момент в мире существует множество бесплатных и качественных источников пространственных данных рельефа местности, получаемых таким способом, однако их отличительной чертой является низкое пространственное разрешение и достаточно нестабильная вертикальная точность (в зависимости от региона исследований).

Популярная модель рельефа SRTM (Shuttle Radar Topography Mission) имеет несколько версий, где самой точной является SRTM1 версии 3, обладающая разрешением в 1 угловую секунду — около 30 м, и в зависимости от местности ее вертикальная точность варьируется от 5 до 10 м. В горных районах и лесистой местности точность может снижаться из-за погрешностей радиолокационной съемки. Также SRTM измеряет именно поверхность, а не землю, поэтому учитывается также высота деревьев и т.п. По актуальности данных эта модель является устаревшей, поскольку съемка проводилась в 2000 г. [16].

Более новым аналогом является ASTER GDEM (Advanced Spaceborne Thermal Emission and Reflection Radiometer Global Digital Elevation Model), она была создана на основе стереоскопических данных, собранных японским спутником Terra с 2000 по 2011 гг. Последняя ее версия — ASTER GDEM v3 включает в себя дополнительные корректировки (например, учет водных поверхностей), но все же по качеству обработки пространственных данных уступает SRTM. Несмотря на аналогичное разрешение в 30 м, данная модель обладает множеством погрешностей: наложение теней от облаков или рельефа, нестабильные показатели вертикальной точности — от 10 до 20 м на равнинах, в то время как у предыдущей модели — до 10 м, а также присутствуют артефакты из-за ошибок стереоскопической обработки и искажения у водных объектов [17].

Модель рельефа ALOS (Advanced Land Observing Satellite) — одна из самых точных глобальных цифровых моделей рельефа (ЦМР), созданная Японским агентством аэрокосмических исследований (JAXA) и поставляется в двух вариантах [18]:

ALOS AW3D Standard — модель, основанная на стереоскопических данных спутника ALOS (DAICHI, данные за период с 2006 по 2011 гг.), с разрешением 2,5-5 м и вертикальной точностью около 5 м, подходящая для региональных агроэкологических исследований, но требующая платного доступа для высокдетализированных данных. Бесплатная ее версия AW3D30 обладает разрешением 30 м, но уступает по вертикальной точности (от 5 до 8 м) и детализации, а также содержит в себе незначительные артефакты от облаков, теней и растительности, шумов в лесах и горах [18].

ALOS AW3D Enhanced, созданная на основе современных снимков коммерческих спутников, таких как WorldView (данные после 2011 г.), с разрешением 0,5-2 м и вертикальной точностью от 2 до 3 м, является одним из идеальных вариантов для проведения точного земледелия, включая анализ микрорельефа и эрозии, но отличается своей дороговизной (от 20 до 100 долл./км²) и доступна только на платной основе. Данная модель содержит в себе минимальное количество артефактов и шумов благодаря современным данным и большому количеству программных обработок [18].

Современной цифровой моделью рельефа также является и FABDEM (Forest And Buildings removed Copernicus DEM), разработанная на основе Copernicus DEM GLO-30 (данные за период 2010-2015 гг.) Университетом Бристолья и Европейским космическим агентством (ESA). Ее особенность состоит в том, что для ее построения использовались алгоритмы для удаления лесов и зданий, обеспечивая более точную вертикальную точность поверхности земли — от 4 до 8 м, что делает ее подходящей для агроэкологических исследований и анализа эрозии в равнинных регионах, хотя ограниченное разрешение и остаточные шумов в горах и лесах снижают ее пригодность для высокоточного земледелия [19].

Модель рельефа TanDEM-X, разработанная Германским аэрокосмическим центром (DLR) на основе данных радарной интерферометрии спутников TerraSAR-X и TanDEM-X (данные за период с 2010 по 2015 гг.), представляет собой высокоточную глобальную цифровую модель рельефа (ЦМР) с разрешением 12-30 м и вертикальной точностью от 2 до 4 м, доступная на платной основе от 50 долл./км² или в бесплатной версии DEMIX (90 м). Однако модель может



содержать незначительные артефакты в зонах с плотной растительностью и сложным рельефом из-за ограничений радарной съемки, а ее высокая стоимость ограничивает использование для крупномасштабных проектов точного земледелия [20].

MERIT DEM и Copernicus DEM GLO-90 — модели, отличающиеся своей актуальностью данных (период сбора 2015–2017 гг.), но обладают достаточно низким пространственным разрешением в 90 м, а также высокими погрешностями и частыми артефактами в виде шумов в горных, урбанизированных и лесных районах [21, 22].

Рассмотренные цифровые модели рельефа являются открытыми и легкодоступными, они наиболее актуальные и активно применяются в научном сообществе, но их пространственного разрешения и вертикальной точности недостаточно для проведения высокоточной агроэкологической оценки отдельных полей и рабочих зон, особенно если они расположены на склоновых участках землепользования. Альтернативным решением для получения высокоточной цифровой модели рельефа может послужить лазерное сканирование земли с применением технологии LiDAR (Light Detection and Ranging) — использование данного метода позволит подробно изучить элементы микрорельефа на территории поля [23].

Лазерное сканирование земли посредством LiDAR-съемки может проводиться как с помощью беспилотных летательных аппаратов, так и с наземных станций. Выходные данные обладают высоким пространственным разрешением — от 0,1 до 10 см и вертикальной точностью — от 5 до 10 см (в зависимости от метода и условий), с минимальными артефактами после обработки.

Для проектирования элементов точного земледелия и разработки качественной картографической основы для проектов адаптивно-ландшафтного земледелия наиболее подходящим и быстрым вариантом является LiDAR-съемка посредством беспилотных летательных аппаратов, поскольку скорость сканирования при полете — до 100 га/час (в зависимости от модели БПЛА и сканера, например, DJI Matrice 300 с Zenmuse L1). Использование данного метода включает в себя обязательную обработку исходных данных в специализированном ПО, например, DJI Terra или Agisoft Metashape, а в случае облета большой территории также потребуются слияние нескольких массивов данных, что увеличивает сроки создания единой модели рельефа. За счет обработки данных результат не содержит артефактов от растительности и погрешностей, однако погодные условия, такие как дождь или сильный ветер, могут понизить их качество [24].

Комбинирование методов аэрофотосъемки и LiDAR-сканирования позволяет создать картографическую основу, отвечающую многим требованиям при проектировании агроэкологических мероприятий. Облако точек, созданное с помощью LiDAR-сканирования, обладает высокой плотностью (от 100 до 1000 точек/м²), что обеспечивает сверхточность высоты местности при создании 3D-модели рельефа, а аэрофотоснимки позволяют создать высокоточные ортофотопланы местности с разрешением 1–5 см, а при их наложении на модель рельефа — предоставить возможность для качественного визуального анализа территории, например, для определения границ полей, рабочих участков или почвенных микрзон. Эта комбинация особенно эффективна в Центрально-Черноземном регионе, где эрозионные процессы на склонах требуют точного анализа уклонов и промоин

(от LiDAR) и зонирования по плодородию почв или состоянию посевов (от аэрофотосъемки), что позволяет оптимизировать севообороты и разрабатывать противоэрозионные мероприятия. Для объединения данных в ГИС (например, ArcGIS или QGIS) LiDAR-облако точек и ортофотопланы синхронизируются, создавая комплексные карты с минимальными шумами, хотя высокая стоимость комбинированной съемки (от 500–1000 долл./км²) и зависимость от погодных условий (облачность, ветер) ограничивают применение на обширных территориях, делая метод наиболее подходящим для локальных полей с высокой эрозионной активностью.

Условия, материалы и методы. Исследования проводилось в 2025 г., целью которых являлась сравнительная оценка источников данных цифровых моделей рельефа для создания точной картографической основы при проектировании адаптивно-ландшафтного земледелия на склоновом агроландшафте. **Объектом** исследования является рабочий участок на склоновом агроландшафте опытного поля в пределах территории отделения № 2 Белгородского ФАНЦ РАН (Белгородская область, Белгородский район, на северо-востоке от села Ерик). Участок в 8,4 га расположен на склоне выпукло-вогнутой формы юго-западной экспозиции, крутизна уклонов от 1 до 8°.

Для анализа рельефообразующих процессов и их визуализации использовались бесплатные последние версии спутниковых DEM-моделей рельефа с 30-метровым разрешением: SRTM1 v3, AW3D30 и FABDEM, которые были выгружены из официальных сервисов. Для корректной визуализации и анализа высот каждая из моделей вырезалась по контуру рабочего участка в ПО Global Mapper (рис. 1).

В 2021 г. была проведена аэрофотосъемка территории беспилотными летательными аппаратами Геоскан 201 и Геоскан 401. Данные комплексы оснащены системой автоматического управления (автопилотом), инерциальной навигационной системой, приемником сигналов GPS/ГЛОНАСС, контроллером управления полезными нагрузками, цифровым каналом связи для передачи командно-телеметрической информации и высокоточным геодезическим приемником Topcon (L1-L2, GPS/ГЛОНАСС/BeiDou) [25]. Полученные пространственные данные обладают аналогичной LiDAR точностью, до 3 см/пиксель, и служат эталонным материалом для изучения рельефа местности склонового агроландшафта (рис. 1).

Для сравнительной оценки точности цифровых моделей рельефа в ArcGIS с помощью набора инструментов Spatial Analyst были построены карты уклонов (рис. 2). Кроме того, для проверки наличия эрозионных процессов на территории рабочего участка была построена карта направления стока.

Полученные картографические модели (направления стока, уклоны) были верифицированы с помощью данных полевых обследований. В частности, на карту были наложены результаты агрохимического анализа почв на содержание подвижного фосфора в виде картограммы интерполяции методом Кригинга, полученной с применением модуля Geostatistical Analyst в ArcGIS. Известно, что фосфор, как малоподвижный элемент, склонен к перераспределению по склону вместе с твердым стоком при эрозии.

Результаты и обсуждения. Сравнительный анализ показал, что интервалы высот у разных DEM-моделей отличаются и варьируются от 2 до 5 м в зависимости от границ области изучения,

наилучший показатель и более плавный переход «низко-высоко» наблюдается у модели FABDEM из-за своих особенностей на этапе обработки данных поставщиком. Модели SRTM и AW3D30 демонстрируют более «ступенчатый», генерализованный рельеф, что является прямым следствием их низкого пространственного разрешения (30 м) и метода получения. В свою очередь, цифровая модель рельефа, полученная по данным аэрофотосъемки с БПЛА, кардинально превосходит спутниковые аналоги по детализации. Она не только точно фиксирует общий уклон местности, но и выявляет микроформы рельефа — борозды, промоины и микроповышения, которые полностью «теряются» в спутниковых данных из-за их низкого разрешения. Таким образом, на примере сравнительного анализа становится очевидно, что для задач, требующих учета микрорельефа (таких как проектирование технологии точного земледелия для адаптивно-ландшафтных систем и расчет эрозионных индексов), спутниковые DEM могут служить лишь для общей предварительной оценки, тогда как ЦМР на основе аэрофотосъемки с БПЛА является необходимым инструментом для точного картографического обеспечения (табл.).

Отметим, что карты уклонов, построенные на основе спутниковых ЦМР, также демонстрируют значительную генерализацию. Вместо плавного изменения крутизны на склоне выпукло-вогнутой формы, модели SRTM и AW3D30 показывают крупные однородные полигоны с усредненным значением уклона. Модель FABDEM, благодаря коррекции, обладает большей плавностью. Однако карта уклонов, построенная по эталонной ЦМР с БПЛА, с высокой детализацией (~3 см/пиксель) выявляет микроформы рельефа: микроповышения и понижения, начальные формы промоин, которые абсолютно не фиксируются спутниковыми данными. Именно эти микроформы являются ключевыми для оценки эрозионной опасности и планирования противоэрозионных мероприятий на уровне рабочего участка.

Ключевой задачей для проектирования противоэрозионных мероприятий является определение структуры поверхностного стока. В ходе исследования была предпринята попытка построения картограмм направлений стока по методу D8 для всех анализируемых цифровых моделей рельефа. Однако из-за величины ячейки растров ЦМР, полученных в результате спутниковой съемки, и небольшой площади рабочего участка построить картограммы не удалось. Напротив, для высокоточной ЦМР, полученной по данным аэрофотосъемки с БПЛА, построение карты направлений стока было успешно выполнено. Анализ полученной картограммы (рис. 3) определил западное направление стока и выявил четкую, физически обоснованную структуру, соотносимую с картой уклонов. Полученная картограмма подтверждает наличие мест почвенного смыва на карте уклонов.

В результате наложения слоя агрохимического анализа почв по содержанию подвижного фосфора на картограмму направления стока и уклонов (рис. 3) подтвердилась корректность модели. Анализ показал, что минимальные концентрации фосфора были зафиксированы в нижних частях склона, в зоне почвенного смыва, в частности в местах возникновения водотоков и образования борозд и промоин, в то время как его максимальные показатели четко распределены на верхней части склона, где рельефообразующие элементы отсутствуют.



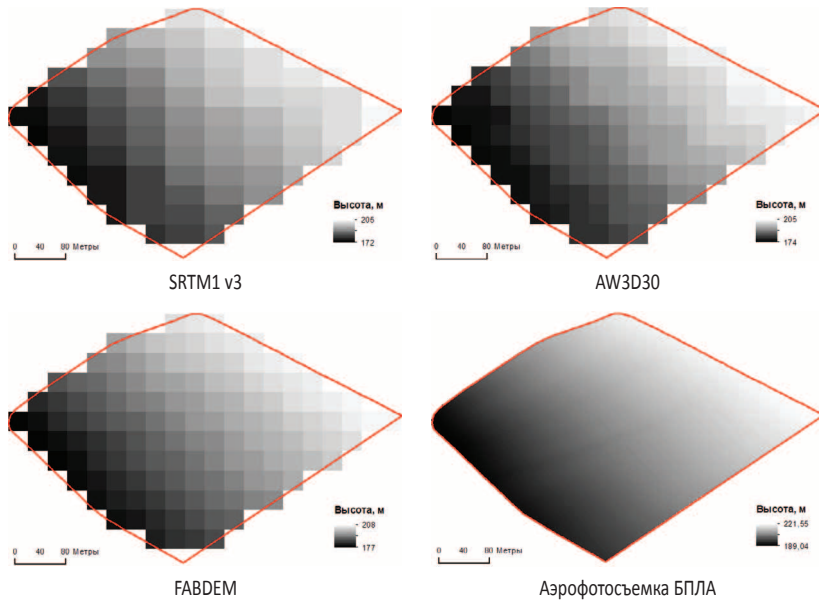


Рисунок 1. Цифровые модели рельефа в границах рабочего участка
Figure 1. Digital elevation models within the working plot boundaries

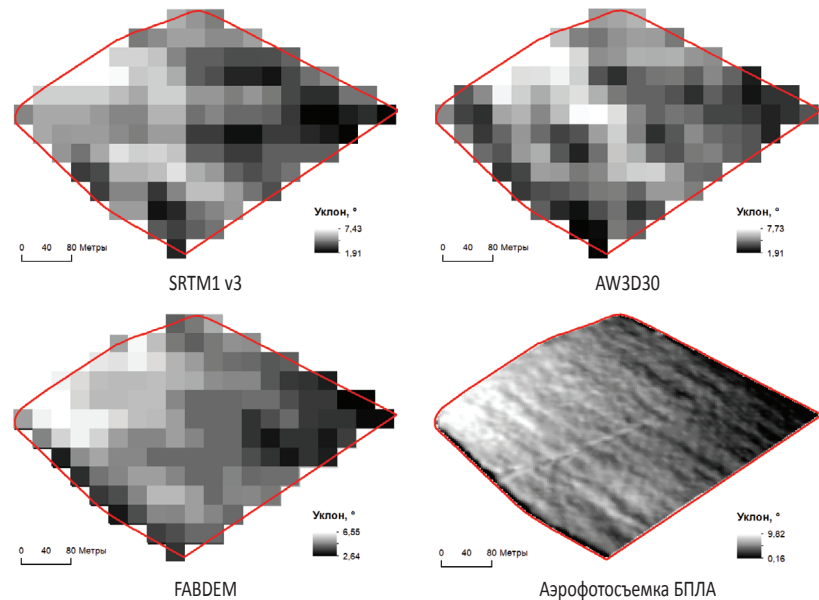


Рисунок 2. Картограммы уклона рельефа в границах рабочего участка
Figure 2. Slope cartograms within the working plot boundaries

Таблица. Интервалы высот спутниковых DEM-моделей рельефа в границах исследуемой области
Table. Elevation intervals of satellite DEM models within the study area boundaries

| Наименование модели | Интервал высот в границах рабочего участка, м |
|---------------------|---|
| SRTM1 v3 | от 172 до 205 |
| AW3D30 | от 174 до 205 |
| FABDEM | от 177 до 208 |
| Аэрофотосъемка | от 189,04 до 221,55 |

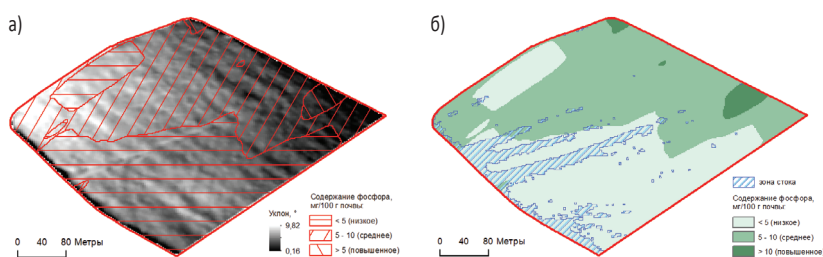


Рисунок 3. Содержание подвижного фосфора в почвах: а) картограмма уклонов; б) картограмма расположения западного смыва
Figure 3. Available phosphorus content in soils: a) slope cartogram; b) cartogram of western washout location

Заключение. Проведенное исследование позволило выполнить сравнительную оценку цифровых моделей рельефа различного пространственного разрешения с целью определения их пригодности для создания картографической основы для технологии точного земледелия адаптивно-ландшафтного земледелия на склоновых агроландшафтах.

Установлены принципиальные ограничения глобальных открытых спутниковых DEM. Модели SRTM, AW3D30 и FABDEM с разрешением 30 м, несмотря на доступность и широкое применение, демонстрируют недостаточную детализацию для задач точного агроэкологического проектирования. Они фиксируют лишь генерализованную морфологию склона, полностью нивелируя микроформы рельефа (борозды, промоины, микроповышения), которые имеют ключевое значение для оценки эрозионной опасности. Попытка гидрологического моделирования (построение карт направлений стока) на их основе оказалась некорректной из-за размеров ячейки раstra, что делает невозможным расчет критически важных эрозионных индексов (например, LS-фактора).

Цифровая модель рельефа, созданная по материалам беспилотной аэрофотосъемки (с точностью до 3 см/пиксель), является единственным рассмотренным источником, обеспечивающим необходимое качество для задач технологии точного земледелия адаптивно-ландшафтного земледелия. Она не только точно отображает общий уклон, но и детально воспроизводит микрорельеф, что позволило построить физически обоснованную карту направлений поверхностного стока, выявив преобладающее западное направление и зоны конвергенции потоков, а также четко соотнести эти зоны с участками развития линейной эрозии, визуализированными на карте уклонов.

Пространственное совпадение зон минимального содержания подвижного фосфора (индикатора смыва почвы) с участками, выделенными по картам уклонов и направлений стока, доказывает практическую ценность высокоточной ЦМР, созданной по данным БПЛА.

Для картографического обеспечения проектов адаптивно-ландшафтного земледелия микроразонального уровня, особенно на эрозионно-опасных склоновых землях, необходим приоритетный переход к использованию высокоточных данных, получаемых с помощью БПЛА. Полученные на их основе производные карты (уклоны, направления стока) являются готовым инструментом для:

- выделения эколого-ландшафтных микроразона;
- обоснованного размещения противоэрозионных элементов (буферных полос, валов) перпендикулярно преобладающему направлению стока;
- разработки дифференцированных агротехнологий в рамках систем точного земледелия.

Таким образом, результаты работы подтверждают, что создание актуальной и точной картографической основы, отвечающей требованиям современных адаптивно-ландшафтных систем земледелия микроразонального уровня, невозможно без применения технологий аэрофотосъемки, что соответствует стратегическим задачам цифровизации агропромышленного комплекса России.

Список источников

1. Российская Федерация. Законы. О землеустройстве: закон РФ от 18.06.2001 № 78-ФЗ // Справочно-правовая система «Консультант Плюс», 2024.
2. Белгородская область. Губернатор. Постановления. Об утверждении Положения о проекте адаптивно-ландшафтной системы земледелия и охраны почв: постановление Правительства Белгородской области от 04.02.2014 № 9 // Справочно-правовая система «Консультант Плюс», 2025.
3. Абаев А.А., Мамиев Д.М. Адаптивно-ландшафтные системы земледелия для предгорной и горной зон РСО-А // Вестник Владикавказского научного центра. 2017. № 2. С. 57-63.
4. Мамиев Д.М. Усовершенствованные севообороты для горной зоны РСО-Алания // Научная жизнь. 2013. № 2. С. 49-53.
5. Мамиев Д.М., Абаев А.А., Тедеева А.А. Биологическая интенсификация звена зернопропашного севооборота // Научная жизнь. 2014. № 3. С. 26-29.

6. Мамиев Д.М., Тедеева А.А., Шалыгина А.А. Научно обоснованные приемы землепользования в РСО-Алания // Наука и мир. 2013. № 1. С. 123-124.

7. Тугуз Р.К., Мамсиров Н.И. Агроэкологическая оценка земель Республики Адыгея // Земледелие. 2012. № 3. С. 31-33.

8. Новиков Д.В. Правовые основы проведения зонирования территории земель сельскохозяйственного назначения // Московский экономический журнал. 2022. № 2. С. 99-108.

9. Фролов А.Н., Зарубин О.А., Машкова Д.Д. К вопросу зонирования земель сельскохозяйственного назначения на основе адаптивно-ландшафтных систем земледелия // Научное обозрение. 2020. № 3. С. 1-10.

10. Слышева Д.П. Совершенствование подготовительных работ внутрихозяйственного землеустройства на основе адаптивно-ландшафтных систем земледелия // Московский экономический журнал. 2022. № 1. С. 183-189.

11. Слышева Д.П. Технологии точного земледелия и их роль в проектах внутрихозяйственного землеустройства на основе адаптивно-ландшафтных систем земледелия // Столыпинский вестник. 2022. № 1. С. 486-491.

12. Российская Федерация. Президент. Указы. О Стратегии научно-технологического развития Российской Федерации: указ Президента РФ от 28.02.2024 № 145 // Справочно-правовая система «Консультант Плюс», 2024.

13. Гостев А.В., Дубовик Д.В. Адаптивно-ландшафтное земледелие в России: основные вызовы XXI века // Адаптивно-ландшафтное земледелие: вызовы XXI века: сборник докладов Международной научно-практической конференции, посвященной 70-летию со дня рождения члена-корреспондента РАН Григория Николаевича Черкасова, Курск, 12-14 сентября 2018 г. Курск: ВНИИЗиЗПЭ, 2018. С. 3-12.

14. Белгородская область. Правительство. Постановление. Об утверждении Положения о проекте адаптивно-ландшафтной системы земледелия и охраны почв: постановление Правительства Белгородской области от 25.04.2022 № 249-пп // Справочно-правовая система «Консультант Плюс», 2024.

15. Смирнова Л.Г., Холодов Д.В. Способы моделирования рельефа поля для проектирования технологии точного земледелия // Землеустройство, кадастр и мониторинг земель. 2023. № 8. С. 473-478.

16. EARTHDATA. Shuttle Radar Topography Mission. Режим доступа: <https://www.earthdata.nasa.gov/data/instruments/srtm> (дата обращения: 10.05.2025).

17. ASTER GDEM PROJECT. Режим доступа: <https://www.jspacesystems.or.jp/ersdac/GDEM/E/> (дата обращения: 10.05.2025).

18. EORCJAXA. ALOS. Режим доступа: https://www.eorc.jaxa.jp/ALOS/en/index_e.htm (дата обращения: 10.05.2025).

19. FATHOM.GLOBAL. FABDEM. Режим доступа: <https://www.fathom.global/product/global-terrain-data-fabdem/> (дата обращения: 10.05.2025).

20. TANDEM-X (DLR/Airbus). TanDEM-X 90m DEM. Режим доступа: <https://download.geoservice.dlr.de/TDM90/> (дата обращения: 10.05.2025).

21. MERIT DEM. Режим доступа: https://hydro.iis.u-tokyo.ac.jp/~yamada/MERIT_DEM/ (дата обращения: 10.05.2025).

22. Copernicus DEM GLO-90. Режим доступа: <https://dataspace.copernicus.eu/explore-data/data-collections/copernicus-contributing-missions/collections-description/COP-DEM> (дата обращения: 10.05.2025).

23. Light Detection and Ranging. Wikipedia. Режим доступа: <https://en.wikipedia.org/wiki/Lidar> (дата обращения: 10.05.2025).

24. Топографическая съемка с использованием беспилотников — Горная промышленность. Режим доступа:

<https://mining-media.ru/ru/article/geoinformsys/17379-topograficheskaya-semka-s-ispolzovaniem-bespilotnikov> (дата обращения: 10.05.2025).

25. GEOSCAN. Продукты: Геоскан 401 Геодезия. Режим доступа: <https://www.geoscan.ru/ru/products/geoscan401-geo> (дата обращения: 10.05.2025).

References

1. Rossiiskaya Federatsiya. Zakony. O zemleustroistve: zakon RF ot 18.06.2001 № 78-FZ (2024). [Federal Law «On Land Management: Law of the Russian Federation» No. 78-FZ of 18.06.2001]. *Spravochno-pravovaya sistema «Konsultant Plus»* [Consultant Plus Legal Reference System].

2. Belgorodskaya oblast'. Gubernator. Postanovleniya. Ob utverzhdenii Polozheniya o proekte adaptivno-landshaftnoi sistemy zemledeliya i okhrany pochv: postanovlenie Pravitel'stva Belgorodskoi oblasti ot 04.02.2014 № 9 (2025). [On Approval of the Regulations on the Adaptive Landscape Farming System and Soil Protection Project: Decree of the Government of the Belgorod Region No. 9 of 04.02.2014]. *Spravochno-pravovaya sistema «Konsultant Plus»* [Consultant Plus Legal Reference System].

3. Abaev, A.A., Mamiev, D.M. (2017). Adaptivno-landshaftnye sistemy zemledeliya dlya predgornoi i gornoj zony RSO-A [Adaptive landscape farming systems for the foothill and mountain zones of the Republic of North Ossetia-Alania]. *Vestnik Vladikavkazskogo nauchnogo tsentra [Vestnik Vladikavkaz Scientific Center]*, no. 2, pp. 57-63.

4. Mamiev, D.M. (2013). Usovshenstvovannye sevoboroty dlya gornoj zony RSO-Alaniya [Improved crop rotations for the mountain zone of the Republic of North Ossetia-Alania]. *Nauchnaya zhizn'* [Scientific life], no. 2, pp. 49-53.

5. Mamiev, D.M., Abaev, A.A., Tedeeva, A.A. (2014). Biologicheskaya intensivatsiya zvena zernopropashnogo sevooborota [Biological intensification of a grain-row crop rotation link]. *Nauchnaya zhizn'* [Scientific life], no. 3, pp. 26-29.

6. Mamiev, D.M., Tedeeva, A.A., Shalagina, A.A. (2013). Nauchno обоснованные приемы землепользования в RSO-Alaniya [Scientifically substantiated land use practices in the Republic of North Ossetia-Alania]. *Nauka i mir* [Science and world], no. 1, pp. 123-124.

7. Tuguz, R.K., Mamsirov, N.I. (2012). Agroekologicheskaya otsenka zemel' Respubliki Adygeya [Agro-ecological assessment of lands in the Republic of Adygea]. *Zemledelie*, no. 3, pp. 31-33.

8. Novikov, D.V. (2022). Pravovye osnovy provedeniya zonirovaniya territorii zemel' sel'skokhozyaistvennogo naznacheniya [Legal framework for zoning of agricultural lands]. *Moskovskii ekonomicheskii zhurnal* [Moscow economic journal], no. 2, pp. 99-108.

9. Frolov, A.N., Zarubin, O.A., Mashkova, D.D. (2020). K voprosu zonirovaniya zemel' sel'skokhozyaistvennogo naznacheniya [On the issue of zoning of agricultural lands]. *Nauchnoe obozrenie* [Scientific review.], no. 3, pp. 1-10.

10. Slysheva, D.P. (2022). Sovershnenstvovanie podgotovitel'nykh rabot vnutrikhozyaistvennogo zemleustroistva na osnove adaptivno-landshaftnykh sistem zemledeliya [Improving preparatory work for on-farm land management based on adaptive landscape farming systems]. *Moskovskii ekonomicheskii zhurnal* [Moscow economic journal], no. 1, pp. 183-189.

11. Slysheva, D.P. (2022). Tekhnologii tochnogo zemledeliya i ikh rol' v proektakh vnutrikhozyaistvennogo zemleustroistva na osnove adaptivno-landshaftnykh sistem zemledeliya [Precision farming technologies and their role in on-farm land management projects based on adaptive landscape farming systems]. *Stolypinskii vestnik* [Stolypinsky bulletin], no. 1, pp. 486-491.

12. Rossiiskaya Federatsiya. Prezident. Ukazy. O Strategii nauchno-tekhnologicheskogo razvitiya Rossiiskoi Federatsii: ukaz Prezidenta RF ot 28.02.2024 № 145 (2024). [On the Strategy for Scientific and Technological Development of the Russian Federation: Decree of the President of the Russian Federation No. 145 of 28.02.2024]. *Spravochno-pravovaya sistema «Konsultant Plus»* [Consultant Plus Legal Reference System].

13. Gostev, A.V., Dubovik, D.V. (2018). Adaptivno-landshaftnoe zemledelie v Rossii: osnovnye vyzovy XXI veka [Adaptive landscape agriculture in Russia: main challenges of the 21st century]. *Adaptivno-landshaftnoe zemledelie: vyzovy XXI veka: sbornik dokladov Mezhdunarodnoi nauchno-prakticheskoi konferentsii, posvyashchennoi 70-letiyu so dnya rozhdeniya chlena-korrespondenta RAN Grigorii Nikolaevicha Cherkasova, Kursk, 12-14 sentyabrya 2018 g.* [Adaptive landscape agriculture: challenges of the 21st century: proceedings of the International scientific and practical conference dedicated to the 70th anniversary of the birth of corresponding member of the Russian Academy of Sciences Grigory Nikolaevich Cherkasov, Kursk, September 12-14, 2018]. Kursk, VNIIZIPE, pp. 3-12.

14. Belgorodskaya oblast'. Pravitel'stvo. Postanovleniya. Ob utverzhdenii Polozheniya o proekte adaptivno-landshaftnoi sistemy zemledeliya i okhrany pochv: postanovlenie Pravitel'stva Belgorodskoi oblasti ot 25.04.2022 № 249-pp (2024). [On Approval of the Regulations on the Adaptive Landscape Farming System and Soil Protection Project: Decree of the Government of the Belgorod Region No. 249-pp of 25.04.2022]. *Spravochno-pravovaya sistema «Konsultant Plus»* [Consultant Plus Legal Reference System].

15. Smirnova, L.G., Kholodov, D.V. (2023). Spособы modelirovaniya rel'efa polya dlya proektirovaniya tekhnologii tochnogo zemledeliya [Methods of modeling the relief of the field for design precision farming technologies]. *Zemleustroistvo, kadastr i monitoring zemel'* [Land management, land monitoring and cadaster], no. 8, pp. 473-478.

16. EARTHDATA. Shuttle Radar Topography Mission. Available at: <https://www.earthdata.nasa.gov/data/instruments/srtm> (accessed: 10.05.2025).

17. ASTER GDEM PROJECT. Available at: <https://www.jspacesystems.or.jp/ersdac/GDEM/E/> (accessed: 10.05.2025).

18. EORCJAXA. ALOS. Available at: https://www.eorc.jaxa.jp/ALOS/en/index_e.htm (accessed: 10.05.2025).

19. FATHOM.GLOBAL. FABDEM. Available at: <https://www.fathom.global/product/global-terrain-data-fabdem/> (accessed: 10.05.2025).

20. TANDEM-X (DLR/Airbus). TanDEM-X 90m DEM. Available at: <https://download.geoservice.dlr.de/TDM90/> (accessed: 10.05.2025).

21. MERIT DEM. Available at: https://hydro.iis.u-tokyo.ac.jp/~yamada/MERIT_DEM/ (accessed: 10.05.2025).

22. Copernicus DEM GLO-90. Available at: <https://dataspace.copernicus.eu/explore-data/data-collections/copernicus-contributing-missions/collections-description/COP-DEM> (accessed: 10.05.2025).

23. Light Detection and Ranging. Wikipedia. Available at: <https://en.wikipedia.org/wiki/Lidar> (accessed: 10.05.2025).

24. Topograficheskaya s'emka s ispol'zovaniem bespilotnikov [Topographic survey using drones]. *Mining Industry Journal*. Available at: <https://mining-media.ru/ru/article/geoinformsys/17379-topograficheskaya-semka-s-ispolzovaniem-bespilotnikov> (accessed: 10.05.2025).

25. GEOSCAN. Produkty: Геоскан 401 Геодезия [Products: Geoscan 401 Geodesy]. Available at: <https://www.geoscan.ru/ru/products/geoscan401-geo> (accessed: 10.05.2025).

Информация об авторах:

Холодов Денис Витальевич, аспирант кафедры природопользования и земельного кадастра Белгородского государственного национального исследовательского университета, ORCID: <http://orcid.org/0009-0000-0870-6591>, SPIN-код: 6439-8879, holodow.denis2016@yandex.ru

Смирнова Лидия Григорьевна, доктор биологических наук, профессор, профессор кафедры природопользования и земельного кадастра Белгородского государственного национального исследовательского университета, научный секретарь Белгородского федерального аграрного научного центра Российской академии наук, ORCID: <http://orcid.org/0000-0003-3633-6617>, SPIN-код: 8777-4248, lidya.smirnova@yandex.ru

Information about the authors:

Denis V. Kholodov, graduate student of the department of environmental management and land cadaster of Belgorod State National Research University, ORCID: <http://orcid.org/0009-0000-0870-6591>, SPIN-code: 6439-8879, holodow.denis2016@yandex.ru

Lidia G. Smirnova, doctor of biological sciences, professor, professor of the department of environmental management and land cadaster of Belgorod State National Research University, scientific secretary of Belgorod Federal Agricultural Research Center of the Russian Academy of Sciences, ORCID: <http://orcid.org/0000-0003-3633-6617>, SPIN-code: 8777-4248, lidya.smirnova@yandex.ru